

# **Projecto de um Berço para Rotação de Fases de Transformadores de Potência do Tipo SHELL**

**EFACEC, Energia**

*Marco António Marques Puig*

**Dissertação do MIEM**

Orientador na EFACEC: Engenheiro Manuel Passos

Orientador na FEUP: Professor Paulo Tavares de Castro



**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**

**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Julho de 2013

*Aos meus pais, por tudo*

*e*

*À Ana, pela dedicação e carinho em todos os momentos*

## Resumo

O presente documento traduz o trabalho desenvolvido ao longo do projecto curricular do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, na opção de Projecto e Construção Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, realizado na empresa EFACEC Energia S.A. entre Fevereiro e Julho de 2013.

O objectivo desta dissertação consiste fundamentalmente num projecto de melhoria do funcionamento de um berço para rotação de fases de transformadores SHELL, processo indispensável no fabrico destes transformadores, e garantir também a capacidade deste suportar fases até 50 toneladas.

Inicialmente procedeu-se ao estudo aprofundado do berço com a actual configuração, para perceber exactamente onde se encontra o problema na rotação das fases. Este acontece devido à instabilidade da máquina aquando do alinhamento do centro de massa do conjunto fase mais berço com eixo de rotação, sendo este, além dos cabos ligados à ponte rolante, o ponto de apoio do berço com o exterior. Para colmatar esta lacuna no processo de rotação, analisou-se soluções construtivas de outros berços existentes no mercado optando-se pela colocação de uma roda dentada que engrena nuns pinos colocados num carril. Desta forma garante-se que este tem sempre um apoio atrás do centro de massa, eliminando os problemas de estabilidade. Numa segunda fase realizou-se o desenho da roda dentada, sendo que a sua configuração define todo o movimento de rotação do berço. Para o estudo da integridade estrutural do berço produziu-se um modelo utilizando um programa de elementos finitos, nomeadamente o Abaqus. Por fim, para finalizar o projecto, procedeu-se ao desenho do berço com as novas alterações e dos novos componentes, utilizando o programa AutoCAD®.

A nível de *softwares* foram usados o AutoCAD® e o Inventor® para desenho, o Abaqus CAE para modelação por elementos finitos, e o Multiframe4D para obtenção de esforços numa estrutura.

Com este projecto espera-se um melhoramento do actual berço para rotação de fases, tornando o processo mais simples e seguro para o operador, conseguindo uma capacidade de 50 toneladas.

## **Abstract**

This document presents all the work developed through the final project of the Master in Mechanical Engineering, in the option of Mechanical Design and Construction, held at EFACEC Energia SA from February to July 2013.

The purpose of this dissertation project is mainly to improve the functioning of a cradle for SHELL transformer phase rotation, vital in the process of manufacture of transformers, ensuring the capacity of 50 tons.

Initially the detailed study of the cradle with the current setting was carried out, to realize exactly where the problem lies in the phase rotation. This is due to the instability of the machine during the alignment of the center of mass of the set phase plus cradle with the axis of rotation. This, together with the overhead crane cables connected to the cradle, is the supporting point to the outside. To fill this gap in the rotation process, constructive solutions of other cradles in the market were analyzed, leading to the choice for placement of a sprocket that engages in some pins placed on a rail. This ensures that the cradle always has one support behind the center of mass and so the stability problems are solved.

In a second stage the detailed technical drawing of the sprocket was carried out, since its configuration determines the rotational movement of the cradle. To study the structural integrity of the cradle was produced a model using a finite element program, namely Abaqus. Finally, to complete the project, the drawing of the cradle with its new design and new components was made using the software AutoCAD ®.

Software's used were AutoCAD ® and Inventor ® for engineering design, Abaqus CAE for finite element modeling, and Multiframe4D to obtain efforts on a structure.

This project is expected to improve the existing cradle for SHELL phase rotation, making the process simpler and safer for workers and achieving a capacity of 50 tons.

## Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos os colaboradores da EFACEC que directa ou indirectamente contribuíram para a realização deste projecto, transmitindo-me conhecimento, incentivando-me, apoiando-me e que diariamente proporcionaram as condições de bem-estar fundamentais para trabalhar, com especial referência para a Dr.<sup>a</sup> Ana Marques, Eng.<sup>a</sup> Joana Marques, Eng.<sup>o</sup> Hélio Teixeira, Sr. Mauro Sousa, Eng.<sup>o</sup> José Flores, Eng.<sup>o</sup> Paulo Mesquita, Eng.<sup>o</sup> Jorge Silva, Eng.<sup>o</sup> Norberto Silva e Eng.<sup>o</sup> Alexandre Cardoso, Eng.<sup>o</sup> Luciano Silva e o Sr. António Silva.

Ao Eng.<sup>o</sup> Miguel Gonçalves, por ter possibilitado a concretização deste estágio.

Ao Eng.<sup>o</sup> Manuel Passos, pela oportunidade que me deu, por me ter integrado na sua equipa e pelo seu apoio e contributo para a concretização deste projecto.

Ao Projectista Ernesto Costa pelo vasto *know-how* que constantemente difunde, assim como pela dedicação transmitida, contribuindo decisivamente para a motivação e realização deste projecto.

Ao Professor Paulo Tavares de Castro, por ter aceitado o meu convite para orientar este projecto, bem como pelo seu interesse e disponibilidade para ajuda durante este.

Ao Eng.<sup>o</sup> João Dias, pela sua disponibilidade e partilha de conhecimento relativa à modelação por elementos finitos.

## Índice

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Apresentação do Grupo EFACEC</b>	<b>1</b>
1.1.1 O Grupo EFACEC	1
1.1.2 História do Grupo	3
1.1.3 Enquadramento no Grupo	5
1.1.4 Transformadores SHELL	6
<b>1.2 O Projecto na EFACEC Energia</b>	<b>9</b>
<b>1.3 Estudo e Desenvolvimento do Projecto</b>	<b>10</b>
<b>1.4 Organização e Temas Abordados no Presente Relatório</b>	<b>11</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Berços</b>	<b>13</b>
2.1.1 Mesas de Montagem e Viragem de CM's	13
2.1.1.1 Hi-Kon:	14
2.1.1.2 Shandong Juli Electro-Machinery	14
2.1.1.3 Maschinenbau Buch GmbH	16
2.1.1.4 Síntese	18
2.1.2 Berços para Fases SHELL	19
2.1.2.1 Berço EFACEC Portugal	20
2.1.2.2 Berço EFACEC EUA	21
<b>2.2 Método dos Elementos Finitos</b>	<b>23</b>
2.2.1 Introdução ao MEF	23
2.2.2 Fundamentos do Método	24
<b>3 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA</b>	<b>27</b>
<b>3.1 Preparação para a Rotação das Fases</b>	<b>27</b>
<b>3.2 Problema do Actual Berço</b>	<b>28</b>
<b>3.3 Solução a Trabalhar</b>	<b>30</b>
<b>4 ESTUDO DA CINEMÁTICA DO BERÇO</b>	<b>33</b>

<b>4.1 Movimento de Rotação</b>	<b>33</b>
<b>4.2 Desenvolvimento da Roda</b>	<b>34</b>
4.2.1 Primeira Fase	36
4.2.2 Segunda Fase	38
4.2.3 Terceira Fase	39
4.2.4 Última Fase	40
 <b>5 MODELAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS</b>	 <b>47</b>
<b>5.1 Estudo Anterior</b>	<b>47</b>
<b>5.2 Modelação em ABAQUS</b>	<b>49</b>
5.2.1 Base	50
5.2.1.1 Modelo Inicial	50
5.2.1.2 Resultados Iniciais	52
5.2.1.3 Modelo Final	54
5.2.1.3 Resultados Finais	55
5.2.2 Lateral	57
5.2.2.1 Modelo Inicial	57
5.2.2.2 Resultados Iniciais	59
5.2.2.3 Modelo Final	60
5.2.2.4 Resultados Finais	62
5.2.3 Roda	65
5.2.4 Carril	67
 <b>6 PROJECTO DO BERÇO E COMPONENTES</b>	 <b>71</b>
<b>6.1 Berço</b>	<b>72</b>
6.1.1 Execução das alterações	72
6.1.2 Desenho Final da Roda	75
<b>6.2 Apoios da Fase</b>	<b>76</b>
<b>6.3 Carril</b>	<b>82</b>
<b>6.4 Apoio para o Berço</b>	<b>83</b>
<b>6.5 Características do berço</b>	<b>88</b>
 <b>7 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS</b>	 <b>91</b>
<b>7.1 Conclusões</b>	<b>91</b>
<b>7.2 Perspectivas de Trabalhos Futuros</b>	<b>92</b>

<b>8 BIBLIOGRAFIA E REFERÊNCIAS</b>	<b>95</b>
<b>ANEXO A – ORGANIGRAMA DO GRUPO EFACEC</b>	<b>97</b>
<b>ANEXO B - FORMULAÇÃO ELEMENTO FINITO TRIDIMENSIONAL (8 NÓS)</b>	<b>99</b>
B.1 Nós, Graus de Liberdade (Variáveis Nodais)	99
B.2 Coordenadas	100
B.3 Funções de Forma	101
B.4 Interpolação do campo de deslocamentos	103
B.5 Matriz das deformações	103
B.6 Matriz de Rigidez	106



## **1 Introdução**

O presente relatório refere-se ao projecto desenvolvido na EFACEC Energia S.A., na divisão Engenharia Industrial, no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, na opção de Projecto e Construção Mecânica. Foi proposto, como tema desta dissertação, o projecto de um berço para rotação de fases de transformadores SHELL.

Neste capítulo visa-se em primeiro lugar a apresentação do grupo EFACEC com especial atenção e descrição detalhada da EFACEC Energia. Aqui explicar-se-á sucintamente o que é um transformador e as principais características de um transformador de tipo SHELL, bem como o seu processo de fabrico. Será também feita uma breve descrição do desenvolvimento deste projecto e, finalmente, uma explicação da organização do presente documento.

### **1.1 Apresentação do Grupo EFACEC**

#### **1.1.1 O Grupo EFACEC**

A EFACEC, o maior grupo electromecânico nacional de capitais portugueses, define assim a sua assinatura:

*“Tecnologia que move o mundo”*

É uma organização portuguesa presente em cerca de 65 países nos cinco continentes, com instalações industriais em nove países, contando no final de 2011 com mais de 4600 Colaboradores e um volume de negócios próximo de 1.000 M€ (EFACEC 2013).

Conforme se pode verificar, a distribuição da EFACEC é mundial, tendo a sua presença diversos patamares de investimento, conforme fica patente na Figura 1:



Figura 1- Distribuição EFACEC no Mundo em termos de Escritórios e Indústrias

O Grupo EFACEC centra-se, em termos de mercado, em áreas de negócio complementares com acompanhamentos específicos de gestão. Todas as empresas reportam funcional e hierarquicamente à sua Área de Negócio e ao Administrador Executivo designado para o efeito. A sua presença passa pelos sectores fundamentais ao desenvolvimento sustentável da sociedade, desde o transporte e distribuição de energia, às renováveis, ambiente e engenharia.

Ao longo dos últimos anos, a EFACEC tem vindo a consolidar a sua capacidade técnica e comercial em mercados altamente exigentes. Fruto deste crescimento sólido e sustentado, e apesar da actual conjuntura macroeconómica muito desfavorável, a EFACEC mantém um elevado volume de negócios e presença nos mercados externos. Em resultado da estratégia de internacionalização que a EFACEC tem vindo a desenvolver, foi possível em 2011 obter um volume de encomendas superior às do ano anterior. O volume das encomendas em 2011 foi de 876 milhões de euros, representando um crescimento de 3% face ao exercício de 2010. É de referir que o mercado externo representa para a EFACEC 76% do total das encomendas obtidas em 2011 e um crescimento de 17% quando comparado com o ano anterior. Será de destacar a

importância dos mercados da América Latina e da África Austral que, no seu conjunto, representam cerca de 46% no volume de encomendas do mercado externo e 35% do mercado global. Em 2011 o volume de negócios atingiu 705 milhões de euros, dos quais 62% se destinaram ao mercado internacional. Quando comparado com os valores do ano anterior

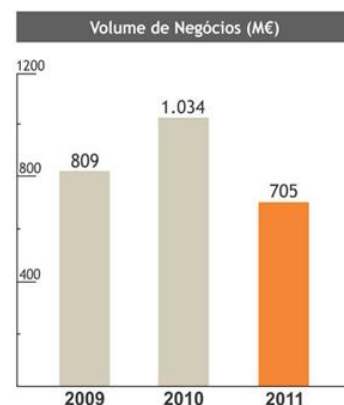
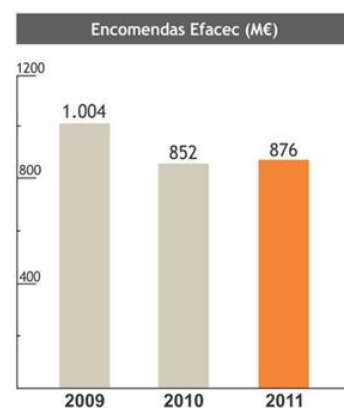


Figura 2 - Encomendas e Volume de Negócios da EFACEC entre 2009 e 2011

verifica-se um decréscimo, influenciado em especial pela contracção de alguns mercados onde a EFACEC está presente, bem como o atraso na adjudicação de importantes obras nesses mercados (EFACEC 2013). Os gráficos da Figura 2 ilustram os valores referidos neste parágrafo.

### 1.1.2 História do Grupo

De seguida, apresentam-se os principais marcos históricos do Grupo EFACEC (EFACEC 2013).

- 1905 Inauguração de “A Moderna, Sociedade de Serração Mecânica de Madeiras”.
- 1921 Fundação da Electro-Moderna, Lda., “Fábrica de Motores e Geradores de c.a. e c.c. de Transformadores e de Acessórios Eléctricos”
- 1948 Fundação da Sociedade Empresa Fabril de Máquinas Eléctricas (EFME), com o capital distribuído entre Electro-Moderna (20%), Ateliers de Construtions Electrique de Charleroi (ACEC) (20%), Companhia União Fabril (CUF) (45%) e outros accionistas (15%). Pretendia criar-se uma empresa sólida, financeira e tecnicamente capaz de concorrer no mercado internacional, cujo negócio seria o “exercício da indústria, comércio, instalação e reparação de material eléctrico e mecânico e de todas as actividades correlativas”.
- 1949 Nova designação: EFA.
- 1957 Início da produção de transformadores
- 1959 Consolidação e ultrapassagem de crises económicas e conjunturais, passando a constituir a maior sociedade portuguesa no campo da electrotecnia.
- 1962 Nova designação: EFACEC.
- 1969 Admissão das acções no mercado de valores de Lisboa.
- 1973 Crescimento de 2,5 vezes da área fabril e de 6 vezes do volume de encomendas, relativamente a 1966.
- 1987 Saída do sócio maioritário, ACEC, e consequente início de um novo período na história da empresa.
- 1990 Criação das primeiras empresas afiliadas detidas a 100% pelo Grupo EFACEC.
- 1999 Aprovação dos princípios orientadores de uma nova estratégia, focada no reforço e na consolidação da competitividade, através da reorganização em três sectores:

Engenharia, Ambiente e Serviços (EAS); Energia (EN); Telecomunicações, Logística e Electrónica (TLE).

- 2002 Consolidação orgânica e estabilidade económica, com foco no valor sinérgico das diversas actividades, na criação de valor, na orientação para o cliente, na criatividade e na inovação dos processos, no rigor de utilização de recursos.
- 2005 Prémio obtido no “Stock Awards 2005” como segunda melhor empresa cotada na Euronext Lisboa; segundo lugar no “Investor Relations Awards 2005” para melhor programa global de investidores.
- 2006 Retirada das acções da bolsa de valores, na sequência do sucesso da operação de lançamento de uma Oferta Pública de Aquisição sobre as acções representativas do capital social da EFACEC, por parte dos seus Accionistas de referência, Grupo José de Mello e Têxtil Manuel Gonçalves. Desempenho das funções de Presidente da Comissão Executiva pelo Sr. Dr. Luís Filipe Pereira. Homenagem da Associação Industrial Portuguesa, com atribuição da medalha de ouro, pelo contributo dado para a sociedade e a economia portuguesas e para a imagem do país nos mercados externos. Inauguração do Laboratório de Ensaios de transformadores de potência, que criou condições para abordar o mercado dos EUA das grandes unidades e entrar no conjunto norte-americano dos maiores fabricantes mundiais de transformadores.
- 2007 Reconhecimentos externos quanto aos princípios, políticas e práticas corporativas: primeiro lugar no prémio “Empresa mais familiarmente responsável”, na categoria das grandes empresas (Deloitte / AESE / Diário Económico); menção honrosa no prémio “Cidadania das empresas e das organizações”, na vertente do desenvolvimento económico, (PriceWaterHouseCoopers / AESE / Exame).
- 2008 Mudança de imagem radical, com novo logótipo, associado ao slogan “Tecnologia que move o mundo”, na sequência da campanha de globalização e inovação.
- 2009 Concluiu-se a EFACEC Power Transformers Inc., a nova fábrica de transformadores de potência da EFACEC situada em Effingham (Geórgia- USA), tendo as operações iniciado em Novembro deste mesmo ano. Na Índia deram-se novos desenvolvimentos relativos à actividade de logística, com a aquisição da maioria do capital da Godrej, pela Gearl – Logistics, com a EFACEC a passar a deter 51% da Joint Venture.
- 2010 Inaugurou-se oficialmente a Efacec Power Transformers Inc. (PTInc.), Effingham (Geórgia-EUA). Com um valor global de investimento de cerca de 180 MUSD, é o maior projecto de sempre na história da EFACEC. A Companhia desenvolveu um intensivo programa de selecção e treino dos novos colaboradores, que até 2015 criará cerca de 600 postos de trabalho directos (1500 indirectos).

- 2011 Em 2011 a EFACEC actualizou as suas declarações corporativas para um melhor alinhamento com as necessidades actuais e futuras da empresa e das suas diferentes partes interessadas. As novas versões da Missão e da Visão explicitam a vocação da EFACEC quanto à criação de novas soluções inovadoras e personalizadas para um mundo sustentável, desenvolvendo infra-estruturas de energia, mobilidade e ambiente.

### 1.1.3 Enquadramento no Grupo

A EFACEC é composta por várias empresas nas mais diversas áreas de negócio:

- Energia (Transformadores, Aparelhagem de Média e Alta Tensão e *Servicing* de Energia)
- Engenharia e Serviços (Engenharia, Automação, Manutenção, Ambiente e Renováveis)
- Transportes e Logística.

No Anexo A é apresentado um organigrama do Grupo EFACEC explicitando as Áreas de Negócio, Empresas e Unidades de Negócio deste.

Devido à complexa organização do grupo, a Figura 3 visa apresentar de forma clara o enquadramento deste projecto.



Figura 3 - Enquadramento da Unidade de Negócios de Transformadores no Grupo EFACEC

#### **Unidade de Negócio:** Transformadores (PT)

Esta unidade destina-se à produção de transformadores de potência, utilizados em centrais, subestações, sistemas de tracção eléctrica e sistemas industriais, tentando responder às exigências cada vez mais dinâmicas destes mercados. Para tal, é fundamental a permanente procura de novos métodos, processos e soluções. Têm vindo a ser construídas novas fábricas e introduzidas inovações e melhorias nos sistemas produtivos existentes, como resultado da reconhecida capacidade e competência da unidade.

Neste mercado, a Siemens e a ABB são os principais líderes a nível mundial e a EN apresenta uma quota entre 1% e 5%. No entanto, com a aposta na qualidade e na fiabilidade dos seus transformadores de potência, a EN já conquistou clientes por todo o mundo. Os mais representativos encontram-se nos Estados Unidos da América (EUA), como a Nevada Power Company e a Pacific Gas & Electricity, e em Espanha, como a Union Fenosa Distribución e a Iberdrola. No mercado nacional, esta unidade do Grupo EFACEC já consolidou a sua posição de líder de mercado, essencialmente devido às encomendas dos seus principais clientes: Energias de Portugal (EDP) e Rede Eléctrica Nacional (REN) (Marques 2008).

A produção da unidade PT está dividida em duas linhas independentes, possuindo a seguinte gama de produtos (EFACEC 2013):

- Transformadores SHELL | 1500 MVA; 525 kV
- Transformadores CORE | 350 MVA; 400 kV
- Subestações móveis CORE ou SHELL | 60 MVA; 245 kV

#### **1.1.4 Transformadores SHELL**

Para se perceber o porquê da necessidade da existência de um berço para virar fases de transformadores SHELL, será, de seguida, feita uma breve abordagem a estes e ao seu processo de fabrico.

Como já foi referido estes são produtos utilizados em centrais, subestações, sistemas de tracção eléctrica e sistemas industriais, incluindo rectificadores e fornos eléctricos.

A Figura 4 remete para a planta fabril SHELL mostrando as principais áreas funcionais:

## Projecto de um Berço para Rotação de Fases de Transformadores de Potência do Tipo SHELL

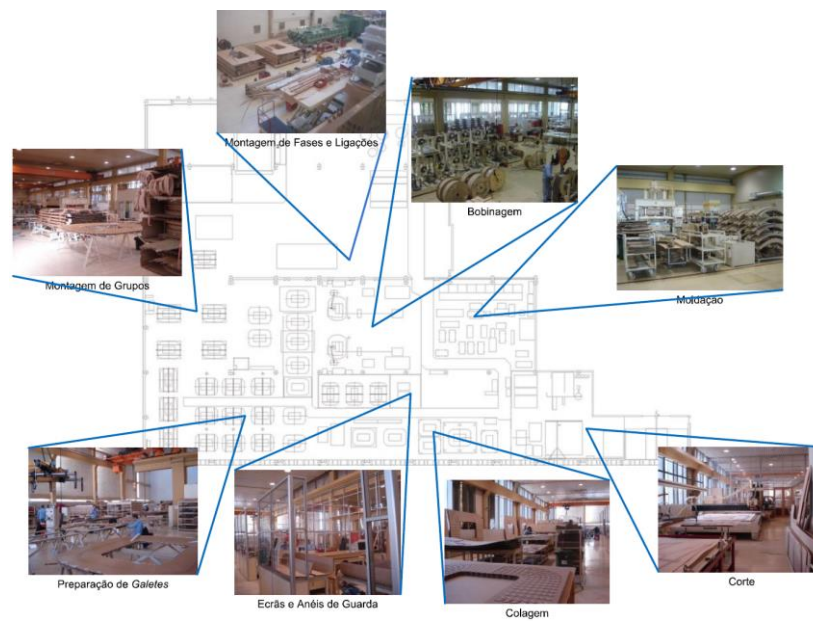


Figura 4 - Áreas funcionais da unidade fabril SHELL

Genericamente, um transformador é constituído por três fases, comumente designadas por U, V e W. Geralmente, estas fases são iguais entre si e têm o aspecto final que se mostra na Figura 5:



Figura 5 - Fase de um transformador SHELL

Estas fases são compostas pela sobreposição de outros elementos designados por grupos, que se ilustra na Figura 6.





Figura 6 - Grupo de um transformador SHELL

Cada uma dessas fases é composta por uma intercalação de rodela (componente isolante) e bobinas de cobre planas também designadas galetes, que permitem a condução eléctrica (esta designação tem origem na antiga associação com a empresa de origem francesa, ACEC). Na Figura 7 e na Figura 8 ilustra-se uma galeite e uma rodela, respectivamente (Teixeira 2008).



Figura 7 - Galeite de um transformador SHELL

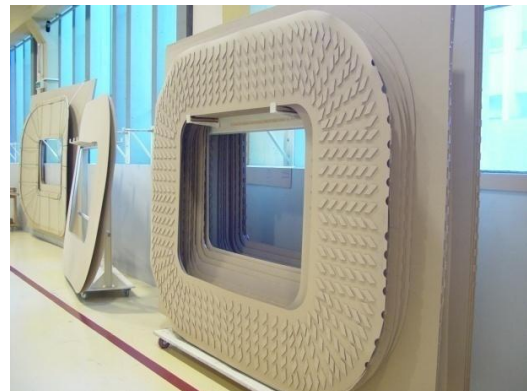


Figura 8 - Rodelas Robot de um transformador

Depois de formada uma fase, esta é secada utilizando vapor de querosene e em seguida é colocada na posição vertical utilizando um berço (que será o nosso objecto de estudo), Figura 9.



Figura 9 - Fase de um transformador SHELL no berço, ainda na posição horizontal



Posteriormente é colocada na parte inferior da estrutura externa do transformador chamada cuba inferior. Seguidamente empilham-se finas placas magnéticas à volta da fase, até uma altura definida em projecto, que constituirá o circuito magnético do transformador (Figura 10). Por fim coloca-se a cuba superior sobre o conjunto, que vem com a cablagem previamente pronta no seu interior, para se efectuarem as ligações internas do transformador (Figura 11). O transformador segue depois para uma segunda secagem seguida da montagem do equipamento exterior e testes em laboratório (Teixeira 2008).



Figura 10 - Fases e circuito magnético de um transformador SHELL



Figura 11 - Montagem da cuba superior de um transformador SHELL

Quando completamente montado, o transformador tem o aspecto que se ilustra nas seguintes figuras:



Figura 12 - Transformador SHELL em serviço

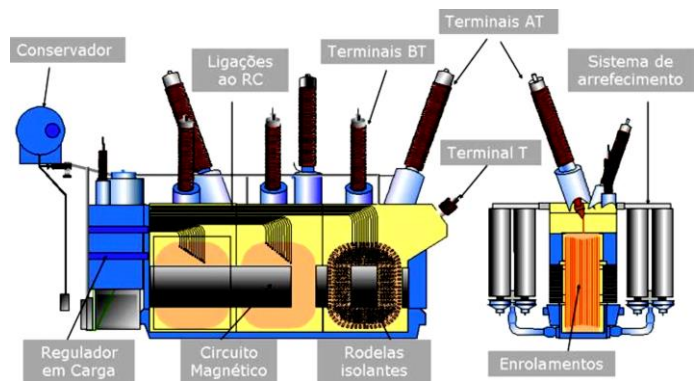


Figura 13 - Legenda de um transformador SHELL típico

## 1.2 O Projecto na EFACEC Energia

Como foi referido, as fases são produzidas na horizontal mas são montadas na cuba inferior na posição vertical recorrendo para isso a um berço que utiliza uma ponte rolante como motor desta rotação.

O berço, devido ao seu actual modo de funcionamento que consiste na rotação sobre um eixo, tem problemas de estabilidade aquando do alinhamento do centro de massa do conjunto fase + berço com eixo de rotação (explicação mais detalhada no Capítulo 3).

Para que este problema não se verifique foi proposto a realização de um projecto que, transformando o actual berço, se consiga aplicar uma solução análoga a um engrenamento do tipo pinhão-cremalheira, como a utilizada em vários berços de circuitos magnéticos (CM's) de transformadores, incluindo, por exemplo, o actualmente utilizado pela EFACEC para o CM's dos transformadores CORE. Esta solução garante que o ponto de apoio se encontra sempre atrás do centro de massa da fase. O berço deve também ser capaz de suportar fases de 50 toneladas.

### 1.3 Estudo e Desenvolvimento do Projecto

O período de duração deste projecto pode ser dividido em cinco etapas, como mostra o diagrama de Gantt da Figura 14.

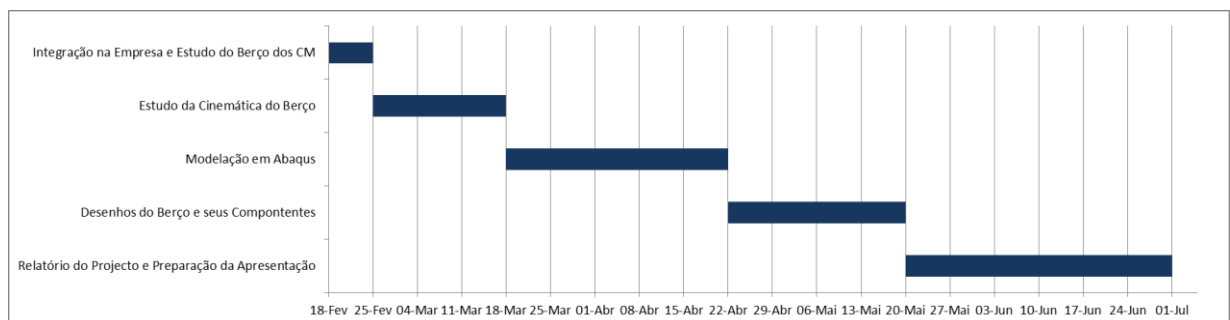


Figura 14 - Diagrama de Gantt das etapas do projecto

**Integração na Empresa e Estudo do Berço dos CM:** como o próprio nome indica, nesta semana, enquanto decorreu a integração na empresa, conhecer os departamentos e áreas da EFACEC Energia, assim como os seus colaboradores, começou por se analisar o berço dos circuitos magnéticos que possui uma solução construtiva idêntica à que se pretende integrar no projecto.

**Estudo da Cinemática do Berço:** esta etapa visou perceber de que forma a rotação se procederia e como criar uma roda dentada capaz de garantir os requisitos, elaborou-se também várias propostas de funcionamento para ser possível discutir qual a adoptar.

**Modelação em Abaqus:** aqui procedeu-se à elaboração do modelo Abaqus para cálculo das tensões e deslocamentos através do método de elementos finitos; assim estudou-se os reforços necessários para garantir o funcionamento íntegro do berço.

**Desenhos do Berço e seus Componentes:** elaboração dos desenhos de conjunto, execução e detalhe do berço e dos novos reforços; projecto dos componentes do berço, nomeadamente o carril, o apoio de fases e apoio do berço, bem como a concretização dos respectivos desenhos.

**Relatório do Projecto e Preparação da Apresentação:** escrita da dissertação e elaboração da respectiva apresentação.

#### **1.4 Organização e Temas Abordados no Presente Relatório**

O relatório está organizado de forma a abranger sete áreas fundamentais na exposição do projecto.

A introdução, capítulo 1, apresenta o projecto, o tema abordado e a empresa na qual foi desenvolvido.

Em seguida, no capítulo 2, será feita uma compilação do estado de arte levando em conta toda a informação relativa a berços com aplicações na área dos transformadores. Aqui também se abordará o método dos elementos finitos.

No capítulo 3 será exposto o problema. Apresenta-se o processo de viragem de fases SHELL actual, mostrando as suas dificuldades e problemas e justificação da escolha da solução optada.

No capítulo 4 aprofunda-se o estudo da cinemática do berço e o método como o berço passará a funcionar.

A modelação em elementos finitos para verificação da necessidade de inserção de reforços será feita no capítulo 5.

O capítulo 6 irá abranger um resumo das alterações ao berço e o projecto dos componentes auxiliares ao funcionamento deste.

O capítulo 7 remete para conclusões e para os possíveis estudos e projectos a realizar nesta área. Por fim, indentifica-se a bibliografia, referências e os anexos que auxiliam este relatório.



## 2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão apresentados vários tipos de berços existentes no mercado. Não será focado nenhum berço em especial, ou seja, procura-se abranger desde o actual berço para virar fase dos transformadores SHELL, aos grandes berços e mesas de montagem para os Circuitos Magnéticos (CM's) dos transformadores CORE, assim como outros berços, de dimensões mais pequenas, nomeadamente os dos transformadores DT. Desta forma será possível estudar e comparar soluções de máquinas que, embora usadas para fins diferentes do caso em estudo, possam ser aplicadas neste projecto.

Além disso, como vai ser usado um programa de modelação por elementos finitos, o Abaqus, faz todo o sentido um estudo e uma pesquisa relativa a este método, para melhor interpretação e compreensão deste. A pesquisa terá em foco os elementos sólidos tridimensionais, já que foram estes os usados na modelação do berço.

### 2.1 Berços

#### 2.1.1 Mesas de Montagem e Viragem de CM's

Os circuitos magnéticos (CM's) dos transformadores são componentes de elevada massa podendo atingir mais de 250 toneladas (Georg 2013). No entanto existem também CM's de massa bastante mais reduzida, nomeadamente os dos transformadores DT com massas inferiores a uma tonelada (valores habituais: 400-600 kg, podendo no entanto chegar às 3t). Estes são construídos através da sobreposição de camadas de chapa magnética, como se mostra na Figura 15, pelo que após finalizada essa tarefa é necessário colocar o CM na posição vertical.

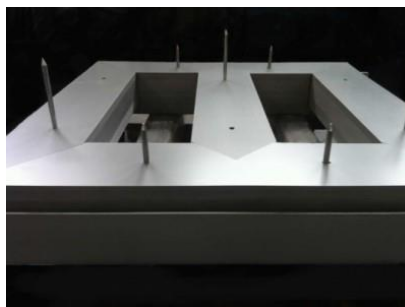


Figura 15 - Construção de CM's

Para isto recorre-se a uma máquina que para além de servir como berço para a rotação, serve também de mesa de montagem dos circuitos. De seguida apresenta-se uma série deste tipo de máquinas existentes no mercado com várias soluções construtivas, de vários fabricantes.

#### **2.1.1.1 Hi-Kon:**

Comecemos pela solução utilizada pela Hi-Kon, empresa croata especializada na fabricação de prensas hidráulicas, máquinas e dispositivos, mas também em maquinaria para a indústria de transformadores.

Relativamente à nossa máquina, este fabricante utiliza uma solução simples que permite a utilização da máquina em qualquer local da fábrica (que tenha ponte rolante) sem qualquer preparação da superfície pois a máquina é apenas pousada nesta. Utiliza um componente curvo que serve de guiamento à rotação da máquina e garante que o ponto de apoio se encontra sempre atrás do centro de massa (Hi-Kon 2013). A Figura 16 visa mostrar três posições, uma em repouso, outra durante o movimento de rotação e a última no final da rotação. É possível ver que no final da rotação são colocados uns suportes para impedir o retorno da máquina à posição inicial aquando do retiro da ponte rolante.



a)



b)



c)

Figura 16 - Máquina da Hi-Kon; a) posição de repouso; b) durante a rotação; c) após rotação

#### **2.1.1.2 Shandong Juli Electro-Machinery**

Esta empresa chinesa é especializada na produção de maquinaria para a indústria de transformadores. O seu material é vendido um pouco por todo o mundo: Alemanha, Suíça,



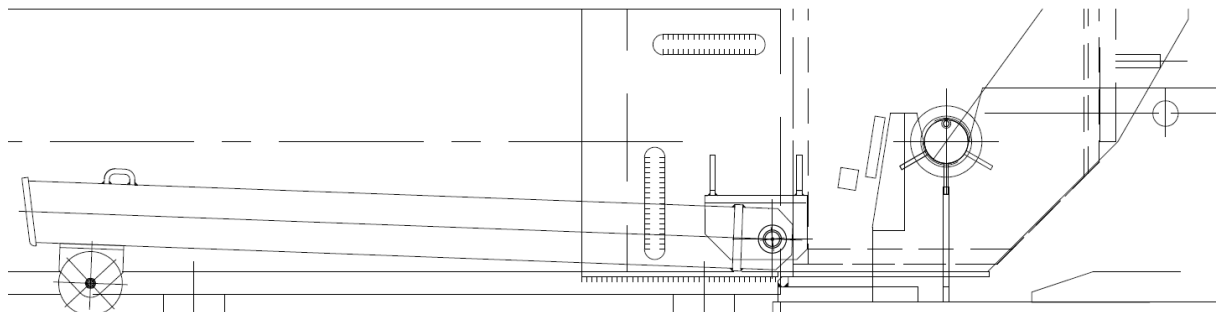
Inglaterra, Espanha, EUA, Canadá, Brasil, Austrália, Índia, África do Sul, etc. Colabora com praticamente todas as grandes empresas que produzem transformadores: Siemens, ABB, Toshiba, EFACEC, etc (Shandong 2013).

No que toca a mesas de montagem e rotação de CM's são capazes de produzir máquinas com elevadas capacidades, até cerca de 350 toneladas. Tal como a máquina vista anteriormente da Hi-Kon, esta também utiliza a ponte rolante como motor da rotação. No entanto, desta vez o movimento é subordinado a um engrenamento análogo a um do tipo pinhão-cremalheira, podendo possuir até seis rodas dentadas. Na Figura 17 apresenta-se uma máquina desta empresa.

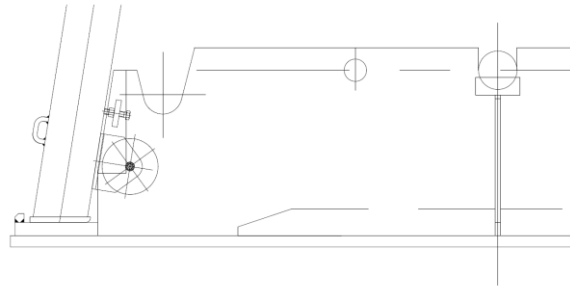


Figura 17 - Máquina da Shandong Juli Electro-Machinery

Aqui, o sistema que impede o retorno da máquina à posição inicial no fim da viragem não é a colocação de um suporte, mas sim através de um componente que se desloca ao longo do chão durante a rotação e que no fim engata num batente que existe no carril. A Figura 18 procura esclarecer essa situação, mostrando a posição inicial e final da rotação.



a)



b)

Figura 18 - Sistema de Engate da máquina da Shandong Juli Electro-Machinery: a) Posição inicial; b) Posição final

### 2.1.1.3 Maschinenbau Buch GmbH

A Maschinenbau Buch GmbH (MBD), empresa alemã do grupo Georg, é uma forte empresa na área dos transformadores. As suas áreas de especialização são a indústria de transformadores e o sector relacionado com o processamento de aço. É provavelmente o maior fornecedor de maquinaria no sector dos transformadores possuindo um vasto leque de máquinas para as mais variadas aplicações (MBD 2013). No caso da máquina em estudo, a sua gama abrange capacidades desde uma tonelada até às 250 toneladas (Georg 2013).

Começemos pelas máquinas de menor capacidade (até 5 toneladas). Estas são bastantes diferentes das que foram apresentadas até agora. O motor da rotação já não é uma grua (ou ponte rolante) mas sim um conjunto de cilindros hidráulicos. Assim a configuração destas máquinas difere bastante das anteriores, ainda que o sistema de montagem dos CM's seja similar. Na Figura 19 podemos ver três posições de uma destas máquinas, uma em repouso, outra durante o movimento de rotação e a última no final da rotação.



a)



b)



c)

Figura 19 - Mesa de montagem e viragem de CM's, MBD - 5t: a) posição de repouso; b) durante a rotação; c) após rotação



Passando agora às máquinas de maior capacidade (10t – 200t), a MBD possui também uma solução com cilindros hidráulicos, ainda que não seja para capacidades demasiado grandes (MBD 2013). A Figura 20 apresenta um exemplar desta.



Figura 20 - Máquina MBD de cilindros hidráulicos

No que toca a máquinas para uso de ponte rolante, a MBD utiliza uma mistura das soluções da Shandong Juli Electro-Machinery e da Hi-Kon. Isto porque, para além de utilizar rodas com engrenamento, utiliza também rodas sem engrenamento, como se pode ver na Figura 21, que mostra a actual máquina EFACEC para montagem e viragem dos CM's dos transformadores CORE.

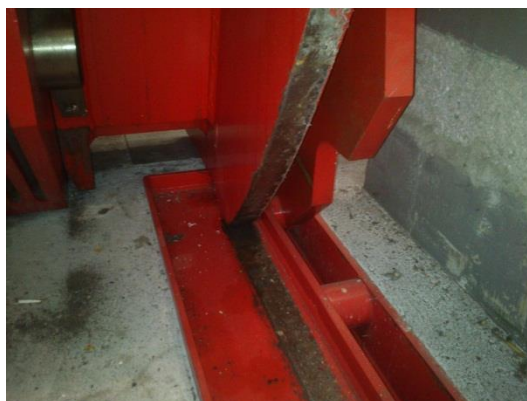


Figura 21 - Sistema de rotação da máquina para montagem e viragem dos CM's CORE

Para além disto estas máquinas têm outras particularidades. Ao contrário de todas as que vimos até agora, a mesa de montagem destas encontra-se numa fundação e separada da parte lateral da máquina (Figura 22.a). Quando se pretende fazer a rotação dos CM's esta última é

colocada em posição e engatada na mesa de montagem com o auxílio de moto-redutores (Figura 22.b).



a)



b)

Figura 22 – Máquina de montagem e viragem dos CM's CORE: a) mesa de montagem; b) componente lateral da máquina

Na Figura seguinte podemos observar o processo de viragem do CM.



Figura 23 - Processo de viragem do CM CORE

#### ***2.1.1.4 Síntese***

Para resumir e tornar mais fácil a compreensão de quais os tipos de mesas de montagem e rotação de CM's vamos recorrer à classificação que se segue.

**Quanto à força motriz:**

Hidráulica	vs	Grua
------------	----	------

**Quanto ao guiamento de rotação:**

Nada	vs	Roda c/ engrenamento	vs	Roda s/ engrenamento	vs	Roda c/ e s/ engrenamento
------	----	-------------------------	----	-------------------------	----	------------------------------

**Quanto à colocação da máquina:**

Com fundação	vs	À superfície
--------------	----	--------------

**Quanto à partição:**

Sem partição	vs	Remoção da componente lateral
--------------	----	----------------------------------

### **2.1.2 Berços para Fases SHELL**

Devido ao restrito número de fabricantes de transformadores de tipo SHELL, as empresas de fabrico de maquinaria não têm berços para rotação de fases nos seus catálogos, ou *web sites*. Assim sendo, estes são protótipos que empresas produzem segundo as especificações do cliente, ou então projectados pelos próprios fabricantes de berços. Por esta razão, de seguida apenas se apresentam os berços utilizados pela EFACEC na fábrica de Portugal e na fábrica dos Estados Unidos da América (EFACEC Power Transformers Inc.).

### 2.1.2.1 Berço EFACEC Portugal

Este berço consiste numa estrutura conseguida por construção soldada. A base é constituída por um estrado de perfis L e chapas de 16mm unidas lateralmente a dois perfis H e na frente a um perfil I, enquanto a componente lateral é constituída por uma chapa frontal, um estrado em chapas 16mm, que terminam também num perfil I soldados superiormente e lateralmente a um perfil H. Estas são reforçadas longitudinalmente com perfis L e transversalmente com dois perfis H. A unir as duas partes encontra-se um perfil tubular quadrado e dois conjuntos de chapas curvas sobre as quais se dá a rotação e que estão ligadas por um veio. O berço pode ser visualizado na Figura 24.



a)



b)



c)

Figura 24 - Berço p/ rotação de fases SHELL - EFACEC Portugal: a) base; b) lateral; c) veio de rotação

A fase é colocada nuns apoios amovíveis (ver Figura 24.a) e a ponte rolante através de um espalha-cabos segura o berço em cada uma das suas extremidades, e a rotação dá-se pelo veio visível na Figura 24.c. A Figura 25 mostra o berço durante a rotação.



Figura 25 - Berço p/ rotação de fases SHELL – movimento de rotação



### **2.1.2.2 Berço EFACEC EUA**

Em 2010 inaugurou-se oficialmente a EFACEC Power Transformers Inc. Também aqui se fabrica transformadores SHELL e como tal foi necessário construir um berço. Para isso recorreu-se à MBD (empresa apresentada anteriormente).

O berço que a MBD projectou é muito diferente do existente nas instalações de Portugal.



Figura 26 - Berço EFACEC EUA

Como podemos ver na Figura 26, este berço é construído sobre uma passarela. A fase é colocada de forma similar ao berço de Portugal, no entanto o movimento de rotação é completamente diferente. Este berço possui uma estrutura que abriga duas correntes. Aqui o movimento de rotação é dado não pela ponte rolante, mas por quatro moto-redutores engrenados na corrente como mostra a Figura 27.



a)

b)

Figura 27 - Berço EFACEC EUA pormenor da engrenagem: a) corrente; b) roda dentada

O seguinte desenho em AutoCAD® ajuda a compreender a solução construtiva deste berço.

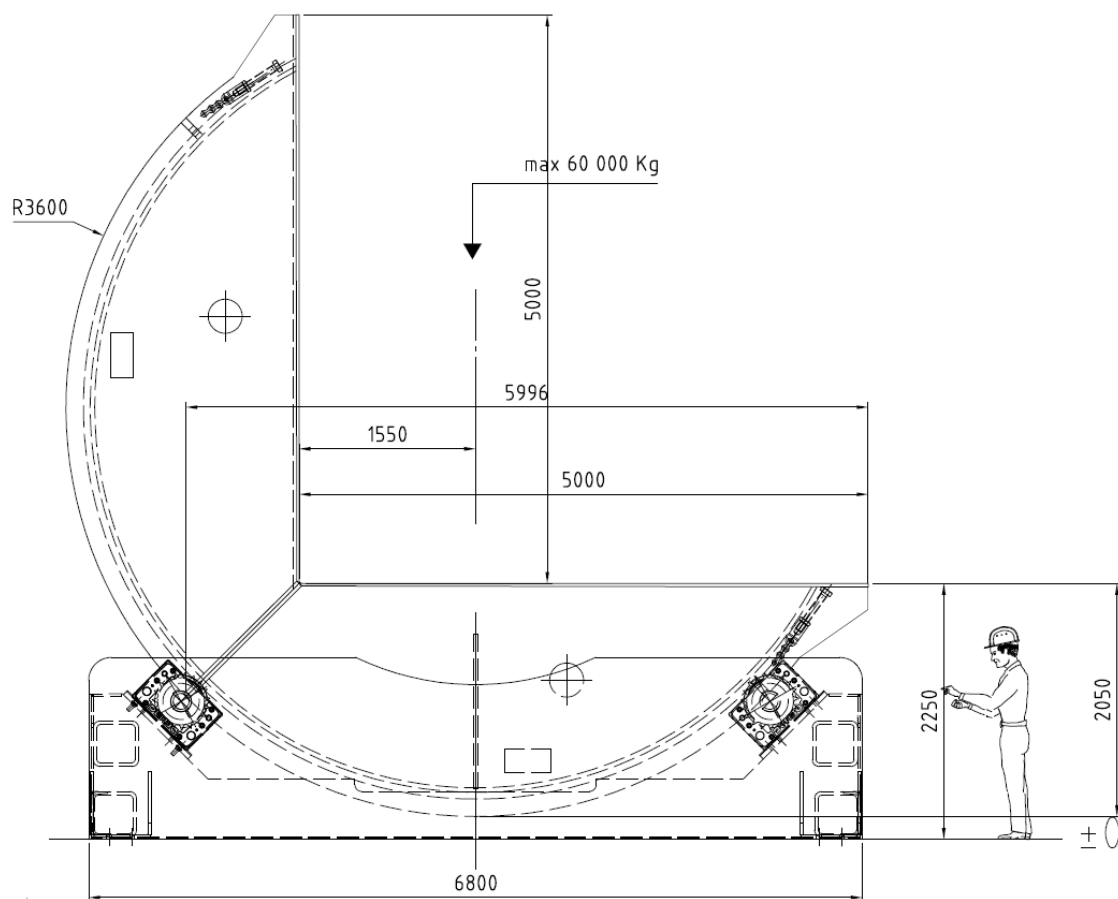


Figura 28 - Desenho do berço EFACEC EUA

Após a apresentação desta panóplia de possíveis soluções para o nosso caso, vamos agora, como foi referido, passar ao estudo do método de elementos finitos.

## 2.2 Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) apresenta actualmente um nível de desenvolvimento que permite a sua utilização pela generalidade dos projectistas de estruturas. Enquanto que no passado muitos dos utilizadores do MEF estavam também envolvidos na respectiva programação em computador, verifica-se hoje em dia que a quase totalidade dos projectistas de estruturas apenas se preocupa com a utilização do correspondente software e com a interpretação dos resultados obtidos, tal como aconteceu neste projecto onde foi utilizado o *software* Abaqus CAE versão 6.12. No entanto, faz todo o sentido que um estudante de engenharia atribua parte do seu tempo à aprendizagem de formulações e metodologias.

### 2.2.1 Introdução ao MEF

Quando surge a necessidade de resolver um problema de análise de uma estrutura, a primeira questão que se coloca é a sua classificação quanto à geometria, modelo do material constituinte e acções aplicadas. O modo como o MEF é formulado e aplicado depende, em parte, das simplificações inerentes a cada tipo de problema. Seguidamente apresentam-se alguns aspectos que é necessário ter em consideração na fase que antecede a análise de uma estrutura (Azevedo 2003):

- **Análise dinâmica ou estática:** As acções sobre as estruturas são em geral dinâmicas, devendo ser consideradas as forças de inércia associadas às acelerações a que cada um dos seus componentes fica sujeito. Por este motivo, seria de esperar que a análise de uma estrutura teria obrigatoriamente de ter em consideração os efeitos dinâmicos. Contudo, em muitas situações é razoável considerar que as acções são aplicadas de um modo suficientemente lento, tornando desprezáveis as forças de inércia. Nestes casos a análise designa-se estática (Azevedo 2003);
- **Análise não linear ou linear:** Na análise de uma estrutura sólida, é habitual considerar que os deslocamentos provocados pelas acções exteriores são muito pequenos quando comparados com as dimensões dos componentes da estrutura. Nestas circunstâncias, admite-se que não existe influência da modificação da geometria da estrutura na distribuição dos esforços e das tensões, isto é, todo o estudo é feito com base na geometria inicial indeformada. Se esta hipótese não for considerada, a análise é designada não linear geométrica. É também frequente considerar que, ao nível do material que constitui a estrutura, a relação entre tensões e deformações é linear. Nos

casos em que esta simplificação não é considerada, é necessário recorrer a algoritmos específicos de análise não linear material (Azevedo 2003);

- Tipo de estrutura: As estruturas podem ser classificadas quanto à sua geometria como reticuladas, laminares ou sólidas. Estas últimas são as mais genéricas, sendo classificadas como sólidas as que não apresentarem características que as permitam enquadrar no grupo das laminares ou das reticuladas (Azevedo 2003).

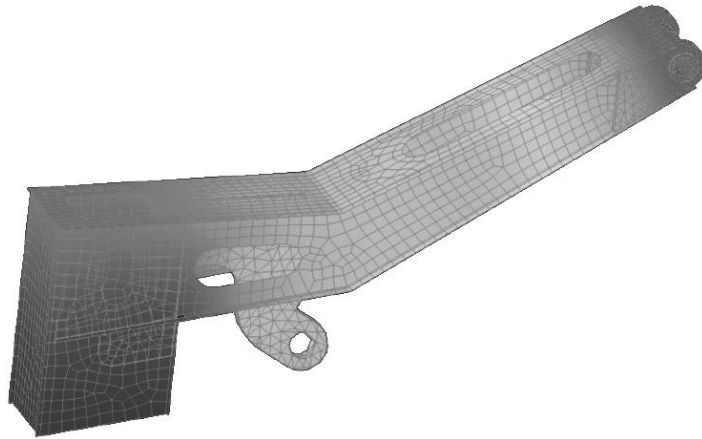


Figura 29 - Distribuição de uma malha de elementos finitos numa peça 3D

### 2.2.2 Fundamentos do Método

A formulação do MEF requer a existência de uma equação integral, de modo que seja possível substituir o integral sobre um domínio complexo (de volume  $V$ ) por um somatório de integrais estendidos a subdomínios de geometria simples (de volume  $V_i$ ). Esta técnica é ilustrada com o seguinte exemplo, que corresponde ao integral de volume de uma função  $f$  (Azevedo 2003)

$$\int_V f \, dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f \, dV \quad (2.1)$$

Em (2.1) pressupõe-se que

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (2.2)$$

Se for possível calcular todos os integrais estendidos aos subdomínios  $V_i$ , basta efectuar o somatório correspondente ao segundo membro de (2.1) para se obter o integral estendido a todo o domínio. Cada subdomínio  $V_i$  corresponde a um elemento finito de geometria simples (por exemplo, segmento de recta, triângulo, quadrilátero, tetraedro, paralelepípedo). O



somatório indicado em (2.1) vai dar origem à operação designada montagem, que apresenta muitas semelhanças com a que é efectuada nas estruturas reticuladas (Azevedo 2003).

A equação integral referida no início desta secção é proveniente da aplicação do método dos resíduos pesados ou de um princípio variacional. No caso da aplicação do MEF à análise de estruturas a formulação mais intuitiva é a que se baseia no Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV) (Azevedo 2003).

No Anexo B é explicitado a formulação dos elementos finitos tridimensionais de 8 nós, elemento utilizado na modelação.



### 3 Apresentação do problema

Este capítulo será dividido em três partes. A primeira parte será relativa à explicação do que antecede o início da rotação de fases. De seguida apresenta-se claramente qual o problema do actual berço e por fim mostrar-se-á qual a solução encontrada e porquê.

#### 3.1 Preparação para a Rotação das Fases

Como foi referido no primeiro capítulo, há um momento no processo de fabrico dos transformadores SHELL que é necessário passar as fases da posição horizontal, para a posição vertical, que corresponde à posição em que estas são montadas na cuba.

A fase é colocada no berço em cima de uns apoios amovíveis, Figura 30, ainda com os tirantes usados para comprimir os constituintes das fases e que foram colocados antes da secagem por vapor de querosene, Figura 31.

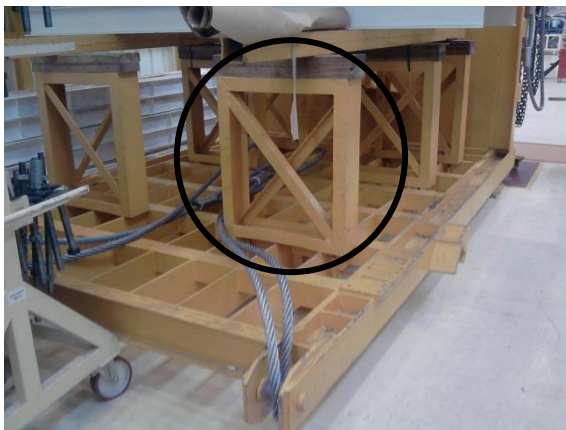


Figura 30 - Apoios amovíveis do berço para virar fases SHELL



Figura 31 - Tirantes roscados para aperto das fases SHELL

Esses tirantes são retirados e é colocado um outro que aperta no berço, Figura 32. Para além disso na parte interior das fases existe um “T” onde apertam quatro suportes, dois deles aparafusados ao berço, os inferiores, e os outros apenas encostados, os superiores, como explicita a Figura 33.

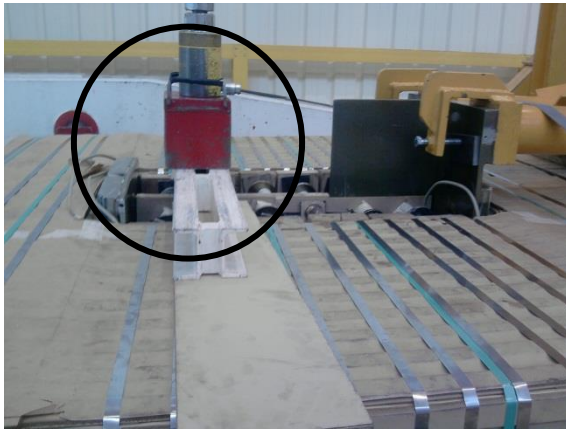


Figura 32 - Tirante de aperto da fase ao berço



Figura 33 – Suportes superiores da fase

A ponte rolante é o motor da rotação deste conjunto. Na extremidade da ponte é colocado um espalha-cabos e cada um dos cabos é preso em cada uma das extremidades do berço. A Figura 34 clarifica esta situação.



Figura 34 - Berço e espalha-cabos

### 3.2 Problema do Actual Berço

O actual berço tem desempenhado essa função de virar as fases, mas possui um problema. Esse problema verifica-se no momento em que o centro da massa da fase se encontra alinhado com o eixo de rotação da máquina, como mostra a Figura 35 obtida através do AutoCAD®.

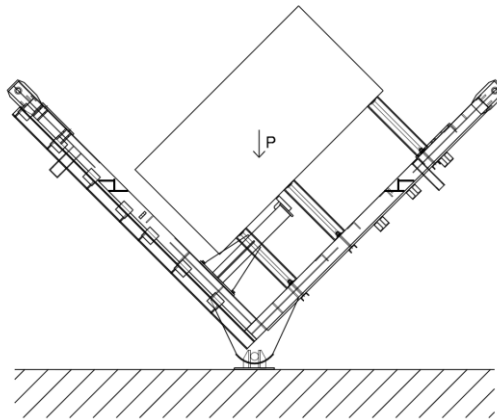


Figura 35 - Momento em que o centro de massa da fase passa no alinhamento do ponto de apoio

Neste momento, os cabos que estavam a ser traccionados para erguer a extremidade do berço e provocar a rotação deste, deixa de estar e a tensão passa para os cabos na outra extremidade. Para que esta passagem de tensão seja perfeita é necessário que a utilização da ponte rolante garanta que, no momento em que o centro da massa da fase se encontra alinhado com o eixo de rotação da máquina, a tensão em cada um dos cabos seja a mesma. Com a Figura seguinte pretende-se clarificar esta situação.

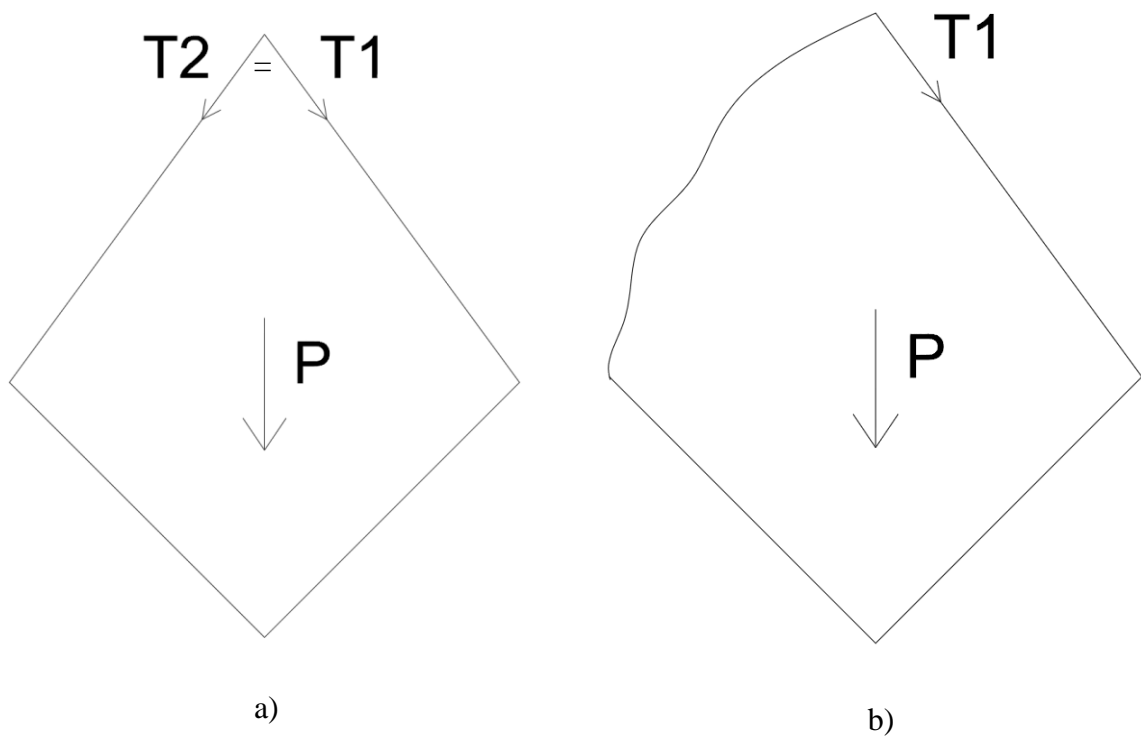


Figura 36 - Tensão dos cabos no momento crítico: a) situação ideal; b) situação limite

A Figura 36.a mostra a situação ideal, ou seja, no momento em questão a tensão em ambos os cabos é a mesma. Em contraste, na Figura 36.b temos uma situação em que os segundos cabos se encontram completamente livres, sendo que o esforço se encontra todo nos primeiros cabos (T1).

Na realidade é praticamente impossível controlar a ponte de forma a garantir que a situação da Figura 36.a se verifique. O que acontece é que se os segundos cabos não estão traccionados no momento em questão, o berço inicia uma rotação livre e de imediato os primeiros cabos perde também a tracção. Este facto provoca um impacto nos segundos cabos e também em toda a estrutura do berço no instante em que finalmente os segundos cabos são traccionados. Ainda que seja possível fazer com que a rotação livre do berço seja mínima através de uma utilização cautelosa da ponte rolante, não é possível eliminá-la por completo.

Tendo agora conhecimento do problema do berço, facilmente concluímos que para a sua resolução deste teremos de aplicar uma solução construtiva idêntica a algumas que foram vistas no capítulo 2, ou seja, algo que garanta que o ponto de apoio se encontra sempre atrás do centro de massa. Desta forma apenas serão utilizados os primeiros cabos, pois estes estarão traccionados durante todo o processo. Assim, este trabalho incidirá no estudo e projecto da solução a aplicar e dos reforços que daí advêm.

### 3.3 Solução a Trabalhar

Por forma a saber qual a melhor solução para o nosso problema vamos rever quais hipóteses a aplicar no nosso berço, através das quais se consiga cumprir os objectivos:

- Roda dentada;
- Roda sem dentes (sem engrenamento);
- Roda dentada + Roda sem dentes;
- Solução  $\frac{3}{4}$  de círculo (berço dos EUA).

A tabela seguinte visa resumir as vantagens e desvantagens de cada uma das soluções para se compreender qual a ideal a aplicar.

Solução	Vantagens	Desvantagens
Roda dentada	↑ Possibilidade de aplicar no berço actual; ↑ Segurança (sem perigo de escorregamento); ↑ Baixo custo.	↓ Elevada altura da fase no final da rotação; ↓ Fixo (o berço terá de ter um local fixo na fábrica).
Roda sem dentes	↑ Possibilidade de aplicar no berço actual; ↑ Baixa altura da fase no final da rotação (menor que solução com roda dentada); ↑ Possibilidade de rotação em qualquer local da fábrica; ↑ Baixo custo.	↓ Perigo de escorregamento; ↓ Possibilidade de causar danos ao chão da fábrica.
Roda dentada + Roda sem dentes	↑ Possibilidade de aplicar no berço actual; ↑ Baixa altura da fase no final da rotação (igual à solução da roda sem dentes); ↑ Segurança (sem perigo de escorregamento).	↓ Aplicação mais complexa; ↓ Custo; ↓ Fixo
$3/4$ de círculo	↑ <b>Funcionalidade ideal;</b> ↑ Segurança; ↑ Altura da fase no final da rotação igual à inicial.	↓ <b>Impossibilidade de aplicar no actual berço;</b> ↓ Elevado custo; ↓ Complexidade do projecto.

Figura 37 - Tabela com vantagens e desvantagens de cada solução

Da análise da tabela anterior podemos concluir que a solução ideal a aplicar seria a idêntica à usada nas instalações dos EUA ( $3/4$  de círculo). No entanto, esta solução envolveria um projecto complexo onde se justificaria a criação de raiz de um berço completamente novo. Além disso os custos associados a este seriam demasiado elevados. Vamos então passar à análise de outros casos.

A aplicação de uma roda sem engrenamento seria também interessante. Isto porque conseguiríamos utilizar o berço em qualquer ponto da fábrica, desde que tivesse ponte rolante, sem preparação do chão (no caso de engrenamento teria de existir um carril preso ao chão). A altura da fase no final da rotação, seria também menor do que se se utilizar engrenamento (por motivos explicados no próximo capítulo). Apesar disto, como não há nada que impeça o deslocamento horizontal da máquina, apenas o atrito, leva à possibilidade de ocorrência de escorregamento nomeadamente em fases mais leves (esta solução foi aplicada para CM's onde a massa é bastante maior). Este motivo parece suficiente para abandonar esta solução.

Temos agora a utilização da roda dentada. É um facto que ao contrário da roda sem engrenamento, estamos limitados a utilizar o berço em determinado local, e altura da fase no final da rotação é ligeiramente superior à solução anterior. No entanto conseguimos, sem grandes alterações ao actual berço (ou seja, relativamente baixo custo), uma solução também perfeitamente funcional e segura, onde não corremos riscos de escorregamento. O problema da altura da fase no final da rotação, que dificulta a acessibilidade a esta, pode ser reduzido aplicando conjuntamente a solução da roda sem engrenamento, no entanto esta solução envolve mais custos, muito mais peso, o que altera o local do centro de massa e, no final de contas, os ganhos não justificam estas adversidades.

Concluimos então que a aplicação de uma roda dentada é a mais indicada. Conseguimos uma solução de baixo custo, segura e que resolve o problema do actual berço. Desta forma, iremos iniciar o estudo e projecto desta solução, dos reforços que desta advêm e de outros componentes necessários.



## 4 Estudo da Cinemática do Berço

Este capítulo visa apresentar o estudo realizado em relação à cinemática do berço, ou seja, o movimento de rotação. Este movimento é comandado pelo formato da roda dentada que tem que garantir que o centro de massa do conjunto berço + fase, nunca se encontra atrás do ponto de apoio. Para a concretização deste estudo foram utilizados os *softwares*:

- AutoCAD® - para criação da roda dentada e verificação da posição centro de massa face ao ponto de apoio;
- Inventor® - para obtenção da posição do centro de massa do berço, assim como a sua massa.

### 4.1 Movimento de Rotação

Antes do desenvolvimento da roda dentada é necessário fazer uma análise para perceber de que forma o movimento de rotação se desenrolará, ou seja, qual será o eixo de rotação do berço. Para tal recorreu-se à análise da mesa de montagem e viragem dos CM's CORE (vista na secção 2.1.1.3), tanto através de desenhos como da observação em fábrica da máquina.

Na verdade o elemento que se tem designado por roda dentada, não é exactamente o que habitualmente é designado de roda dentada. Consiste sim numa peça com uns entalhes semicirculares que permitem engrenar nuns pinos com o mesmo diâmetro situados num carril. A Figura seguinte apresenta o desenho da roda da mesa de montagem e viragem dos CM's CORE.



Figura 38 – Desenho da roda da mesa de montagem e viragem dos CM's CORE

Esta roda difere das habituais rodas dentadas pois, para além de não ser circular, não possui, por exemplo, as envolventes de círculo que caracterizam as rodas dentadas habituais.

Após análise desta roda e da máquina em geral concluiu-se que o eixo de rotação é dado sempre pelo eixo do último pino que foi engrenado, isto é, no início da rotação o eixo de rotação encontra-se ao longo do centro do primeiro pino. No momento em que o segundo pino é engrenado, passa o centro deste a ser o novo eixo de rotação e assim sucessivamente. A Figura 39 mostra o momento de alteração do eixo de rotação.

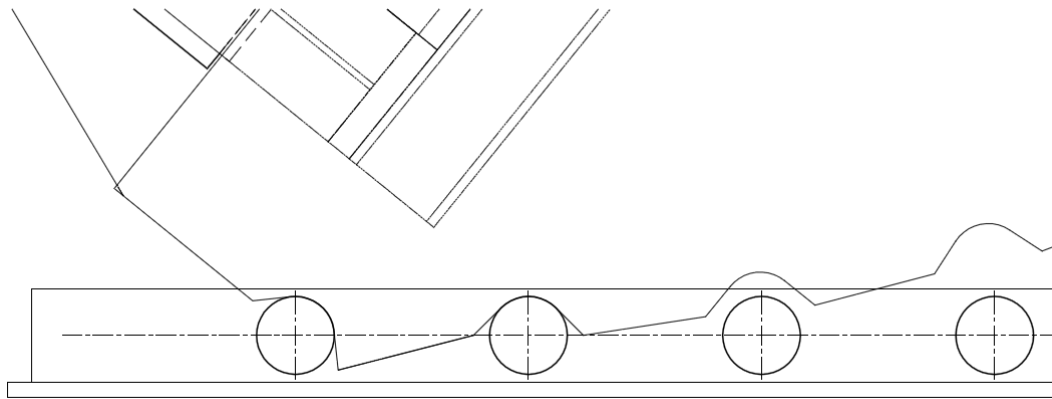


Figura 39 - Momento de troca do eixo de rotação do primeiro pino para o segundo

Sabendo agora de que forma se desenrola o movimento é possível proceder ao desenvolvimento da roda. De referir ainda que, como se pretende que o ponto de apoio esteja sempre atrás do centro de massa, os únicos cabos sujeitos a tensões serão o que estão ligados à base, pelo que os outros não são necessários colocar.

O movimento de rotação inverso, ou seja, a colocação do berço na sua posição inicial, é realizada de forma idêntica, isto é, os cabos utilizados são os mesmos. Também aqui, para evitar problemas, deverá ser garantido que não há alterações na posição do centro de massa, agora apenas do berço, face ao ponto de apoio.

## 4.2 Desenvolvimento da Roda

O projecto da roda envolveu várias tentativas por forma a descobrir qual o método mais eficaz. É preciso ter em atenção que isto não se trata de um engrenamento comum com envolventes de círculo pelo que será necessário descobrir um método para a criação desta.

A Figura 40 apresenta fases SHELL com dimensões de valores limite, existem, no entanto, fases com dimensões diferentes destas:

Projecto	K (mm)	W (mm)	H (mm)	C (mm)	E (mm)	Massa (t)
E1320097A	2369	1713	996	1227	741	7,1
E8020031A	3910	2710	1856	1681	870	28,8
E8020031A	4330	2455	2163	2260	865	26,8
E1320106A	4265	2686	2377	1951	736	-
E1300004A	3980	2881	1461	1946	1141	27,1
E1320076A	3425	2360	2380	1682	886	-

Figura 40 - Dimensões de algumas fases SHELL

Sendo que as letras correspondem às seguintes variáveis:

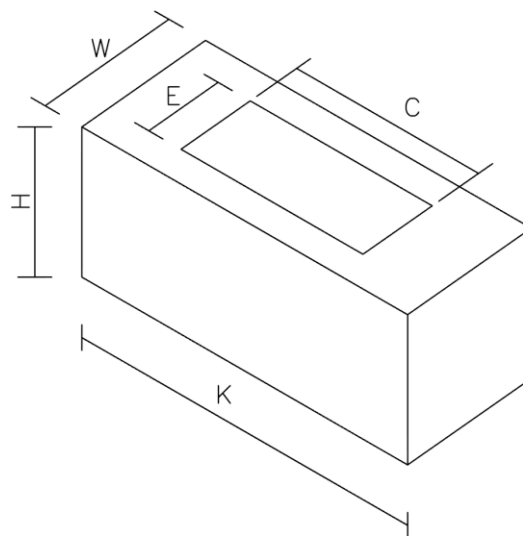


Figura 41 - Variáveis das dimensões de uma fase SHELL

Vamos assumir que a fase é simétrica nos três eixos e que, portanto, o centro de massa e o centróide encontram-se na mesma posição do espaço.

Cada um dos subcapítulos seguintes remete para uma forma diferente de projectar a roda, algumas com sucesso, outras sem, utilizando o AutoCAD®.

#### 4.2.1 Primeira Fase

Numa primeira abordagem procurou-se projectar uma roda tendo como base as dimensões e o formato da que está presente na máquina relativa ao CM's CORE. O peso da máquina não foi tido em conta.

No que toca ao carril, considerou-se pinos de 40mm de raio com distância de 300mm entre o centro de cada um.

Para garantir que o engrenamento é perfeito procedeu-se ao desenho da seguinte forma:

1. Desenho de um esboço da roda na posição inicial com o primeiro engrenamento já desenhado e desenhado também a linha de centro dos futuros engrenamentos, como mostra a Figura seguinte:

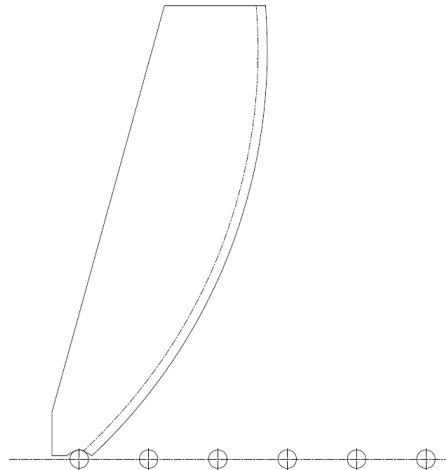


Figura 42 - 1º Passo para criação da roda (1ª Fase)

2. Provocar uma rotação com centro no primeiro pino até à linha de eixo coincidir com o centro do segundo pino.
3. Desenhar o segundo engrenamento na roda, de acordo com a Figura 43:

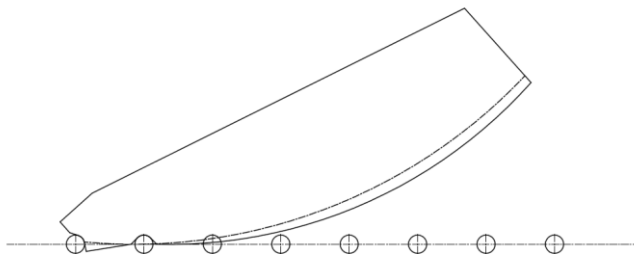


Figura 43 - Desenho do 2º Engrenamento (1ª Fase)

4. Proceder de forma idêntica para os seguintes pinos, tendo em conta que o centro da rotação é sempre o último engrenamento desenhado.

5. O último engrenamento é desenhado de forma a garantir que a rotação termina exactamente a  $90^\circ$ .

Foram experimentados vários raios da linha de centro dos engrenamentos para tentar garantir que a última rotação era idêntica às anteriores. A Figura 44 mostra algumas tentativas.

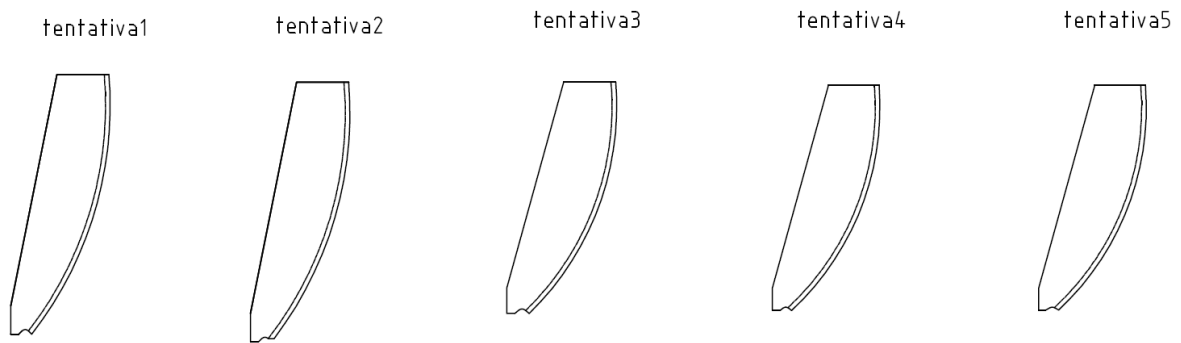


Figura 44 - Tentativas de criação da roda (1ª Fase)

Finalmente conseguiu-se uma roda satisfatória (Figura 45).



Figura 45 - Roda final (1ª Fase)

No entanto, quando se colocou na posição de funcionamento verificou-se que se tinha cometido um erro. Apesar de ter as dimensões idênticas às da máquina dos CM's CORE, a roda era demasiado pequena para o berço, e como podemos observar na Figura 46, basta analisar o momento final da rotação para perceber que o centro de massa ultrapassou o ponto de apoio do conjunto.

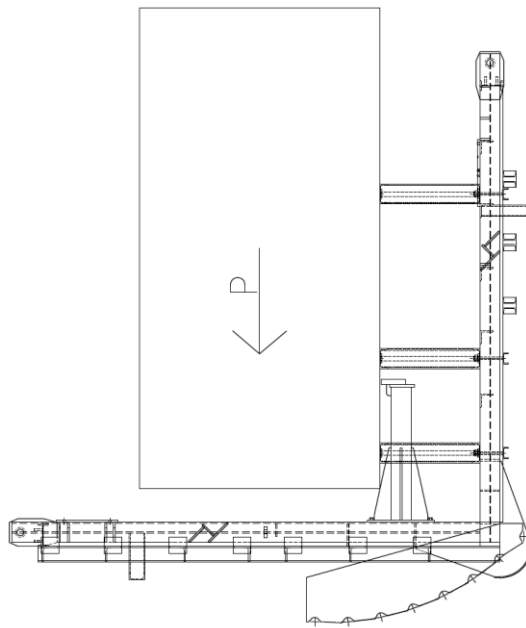


Figura 46 - Posição final (1º Fase)

#### 4.2.2 Segunda Fase

Tendo em conta o erro cometido na primeira fase, nesta secção a roda será de dimensões maiores tal que na posição final o ponto de apoio continue a situar-se atrás do centro de massa. No entanto, o processo de criação da roda será idêntico ao anteriormente utilizado. O peso da máquina também não foi tido em conta.

Em relação ao carril, optou-se por utilizar pinos de 50mm de raio mantendo a distância de 300mm entre o centro de cada um.

Com a Figura seguinte pretende-se mostrar as dimensões da nova roda.

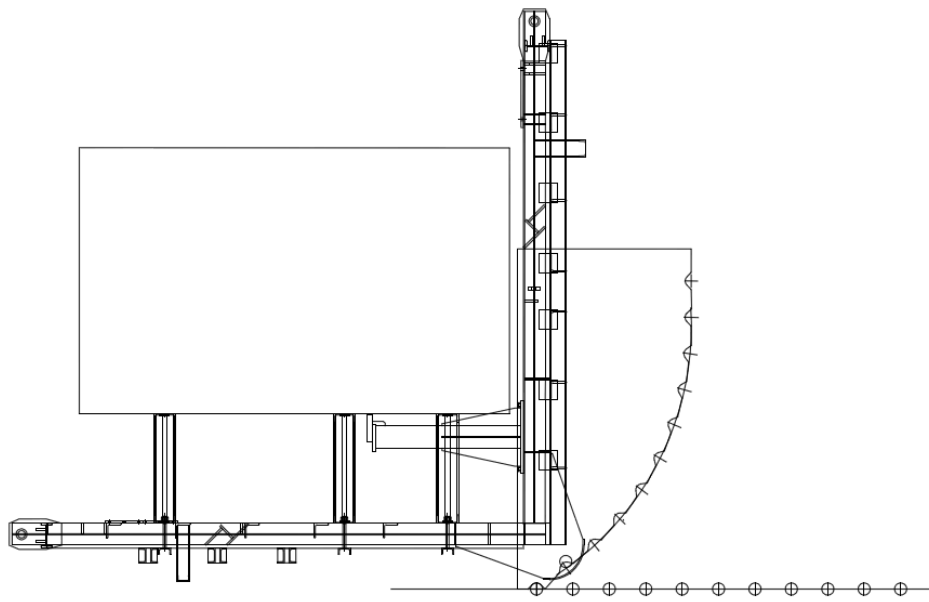


Figura 47 - Berço c/ roda (2ª Fase)

Tendo a roda já projectada iniciou-se os testes, ou seja, a verificação de que o centro de massa se encontra sempre atrás do ponto de apoio. Observando a Figura 47 conclui-se que na posição final o nosso objectivo é cumprido. No entanto, há momentos da rotação em que isso não se verifica como se mostra na Figura 48. Nesta posição o centro de massa encontra-se à frente do penúltimo pino, o que significa que no momento imediatamente anterior, o centro de massa da fase tinha passado além do ponto de apoio o que provocava um problema idêntico ao que o berço já possuía.

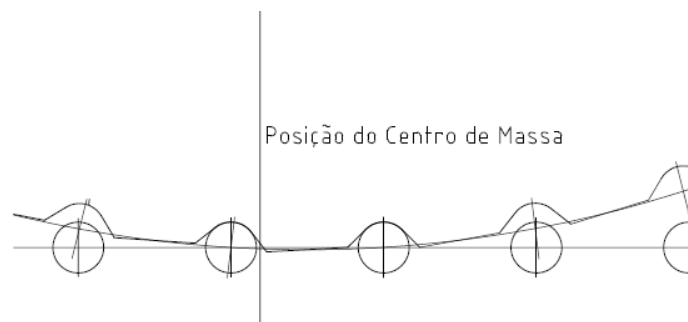


Figura 48 - Posição do centro de massa (2ª Fase)

#### 4.2.3 Terceira Fase

A falta de sucesso levou à conclusão de que seria necessário arranjar outro processo para projectar a roda. Para isso trabalhou-se de forma a tentar um método que conseguisse eliminar

o processo anterior de “tentativa erro” e que garantisse que se conseguia cumprir com os requisitos.

Desta forma surgiu o seguinte método:

1. Desenhar a máquina com a roda apenas com o primeiro engrenamento consoante a posição desejada para o carril, tal como na Figura seguinte:

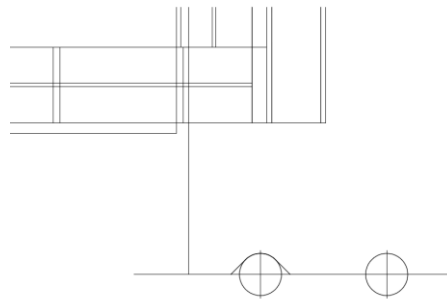


Figura 49 - Primeiro engrenamento (3ªFase)

2. Provocar uma rotação no berço e verificar a posição do centro de massa. Quando se achar necessário, criar o engrenamento seguinte na posição correspondente, como se mostra na seguinte Figura:

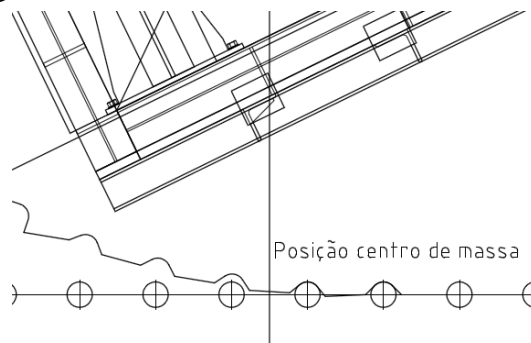


Figura 50 - Posição do centro de massa e criação do seguinte engrenamento (3ªFase)

3. Ter em atenção que o último engrenamento deve garantir os 90° de rotação.

Com este processo conseguimos garantir que no final temos uma roda completamente funcional para a posição considerada do centro de massa, e além disso atribuir um coeficiente de segurança à escolha do projectista. Pode-se então concluir que se tem um método de criação da roda eficaz e que se justifica passar agora para uma análise mais rigorosa tendo em conta também o peso da máquina.

#### 4.2.4 Última Fase

Nesta fase pretende-se finalizar o projecto da roda. Para isso será necessário saber qual a posição do centro de massa do berço, assim como o seu peso, para se poder calcular o centro



de massa do conjunto. Além disto, devido ao facto de que uma elevada altura da fase no final da rotação dificulta o acesso ao berço, é necessário saber como posicionar o berço e a roda, tendo em conta a altura final assim como a praticidade da solução.

Com vista a conseguir-se baixar a posição da fase no final da rotação, a altura dos apoios das fases será reduzida para metade, ficando com 450mm de altura. Desta forma o centro de massa do conjunto berço + fase é rebaixado. Realizou-se então o desenho em 3D do berço (Figura 51).

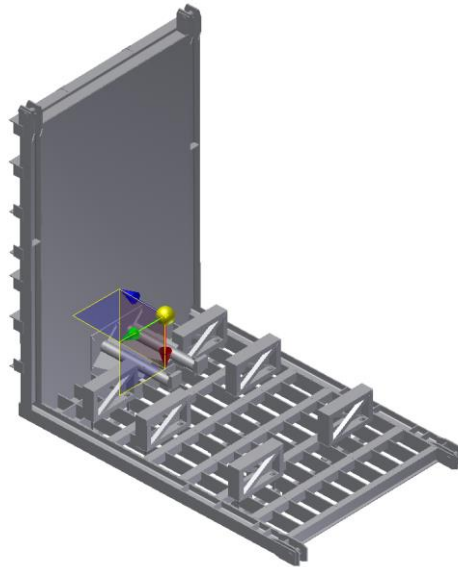


Figura 51 - Berço 3D com posição do centro de massa

Sabemos desta forma a posição do centro de massa bem como o volume ( $\cong 0.779 \text{ m}^3$ ) e sendo a massa volúmica do aço  $\cong 7860 \text{ kg/m}^3$ , obtém-se uma massa de  $6123 \text{ kg}$ . Temos agora todos os dados necessários para calcular o centro de gravidade do conjunto. Recorrendo à expressão (Vasco 2007):

$$\overrightarrow{OG} = \frac{\sum_{k=1}^n m_k \overrightarrow{OP_k}}{M} \quad (4.1)$$

Podemos então representar, utilizando uma fase do tamanho da E1320076A (a maior e portanto que leva à situação mais crítica) mas com um peso de 50t, o que é ainda mais prejudicial:

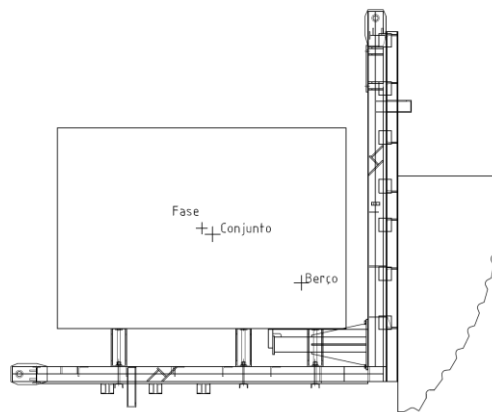


Figura 52 - Localização do centro de massa do berço, fase e conjunto

Foram feitas e discutidas as seguintes propostas para colocação do berço e da roda:

1. Roda soldada aos perfis H da parte de trás da máquina (Figura 53) e os pinos colocados numa fundação (Figura 54)

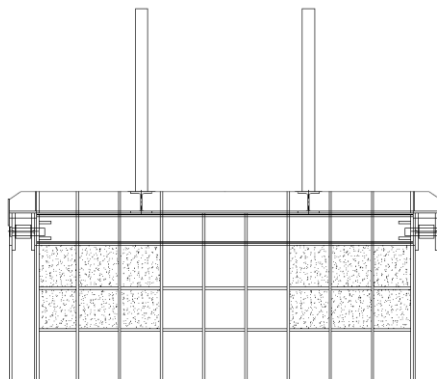


Figura 53 - Roda na parte traseira



Figura 54 - Fundação para pinos

2. Roda soldada aos perfis H laterais do berço (Figura 55) e os pinos colocados numa fundação tal como na situação 1.

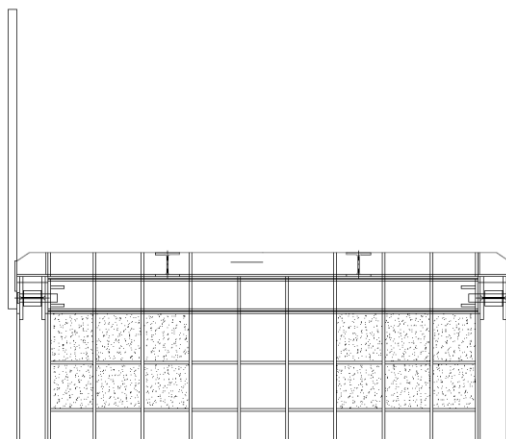


Figura 55 - Roda na lateral

3. Roda soldada aos perfis H laterais do berço (situação 2) e os pinos colocados num suporte acima do nível do chão (Figura 56).

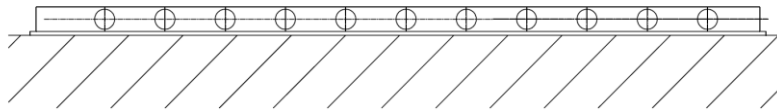


Figura 56 - Pinos colocados num suporte

A altura a que a fase no final da rotação ficaria do chão em cada um dos casos é:

Situação	Altura (mm)
1	1506
2	1312
3	1348

Figura 57 - Altura da fase em cada uma das situações

Analisando as três situações concluímos que a situação melhor seria a número 3, isto porque em comparação com a situação 1 a fase fica bastante mais baixa e comparando com a situação 2 os ganhos em altura desta não justificariam fazer uma fundação, para além de que limitaria a utilização do berço naquele local e seria muito dispendioso se no futuro fosse necessário proceder à alteração do *layout* da fábrica.

Depois de tomada a decisão quanto à solução a aplicar, foi proposto ter em conta não uma fase já existente, mas uma fase de maior altura (mas que fosse possível colocar no berço), ainda que com 50t também, o comprimento não se aumentou relativamente à fase E1320076A, o que nos leva para uma situação mais crítica porque o centro de massa encontra-se mais perto do ponto de apoio na roda. A altura final foi de 1600mm. O resultado final provisório para a roda foi o seguinte:

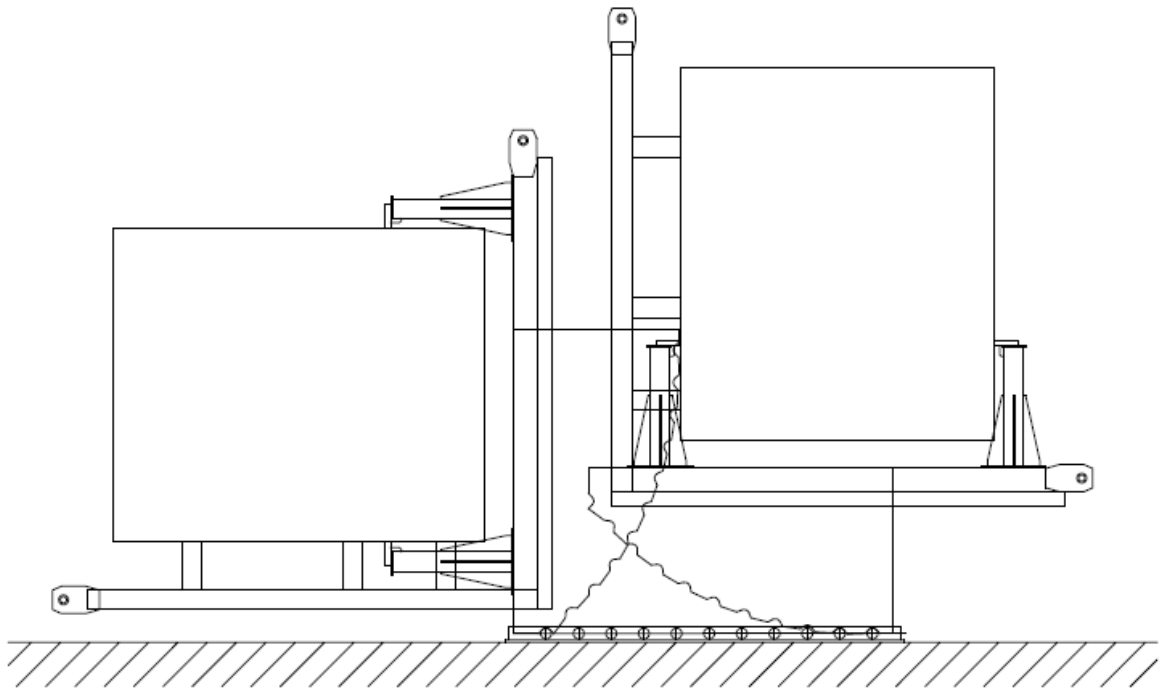


Figura 58 - Berço com posição inicial e final

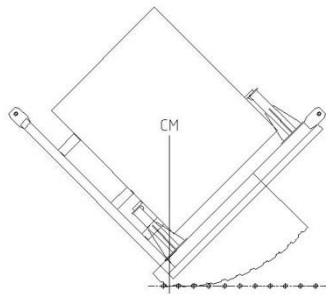
Provisório porque de seguida será feita a modelação do berço em elementos finitos para estudar onde colocar reforços, e estes últimos irão alterar o centro de massa do berço, pelo que se terá de alterar novamente a roda. No entanto, e como se verá mais à frente, as alterações futuras serão muito ligeiras, pelo que a distância ao solo não sofrerá grandes alterações e esta pode ser considerada na modelação sem pôr em causa a sua veracidade.

Foi também verificado que o berço no movimento de retorno, a trabalhar em vazio, não possui problemas relativos ao centro de massa.

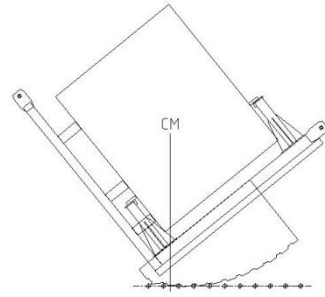
As seguintes imagens pretendem resumir o processo de rotação, apresentando os momentos de engrenamento e a localização do centro de massa em cada um destes.



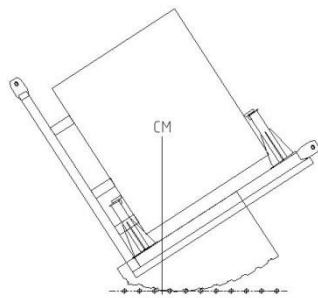
Projecto de um Berço para Rotação de Fases de Transformadores de Potência do Tipo SHELL



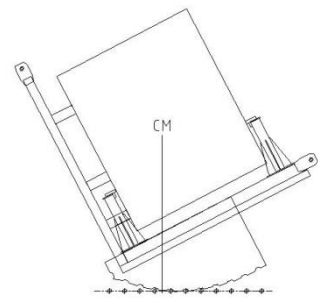
2



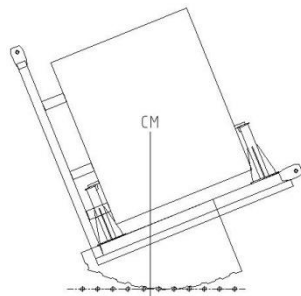
3



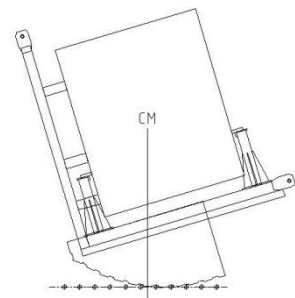
4



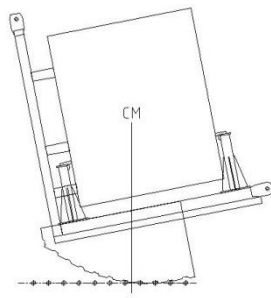
5



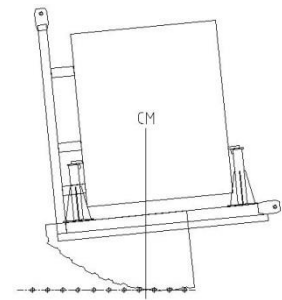
6



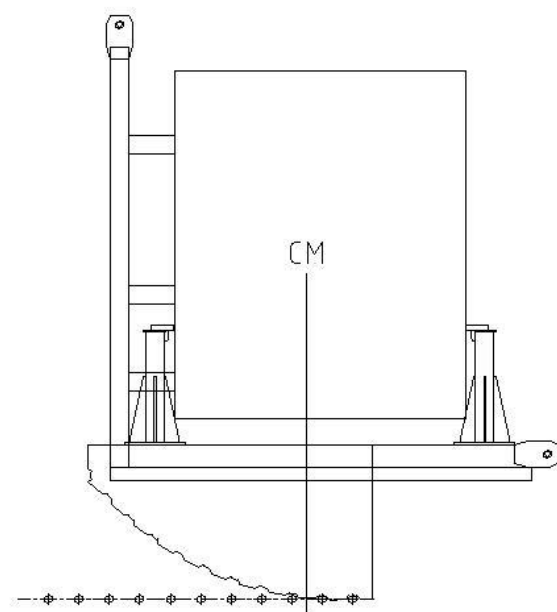
7



8



9



10

Figura 59 - Movimento de rotação do berço

## 5 Modelação por Elementos Finitos

Finalizado o estudo relativo à cinemática do berço, coloca-se agora a questão da resistência da estrutura do berço quando sujeito a uma fase de 50 toneladas. De referir ainda que a alteração no modo de rotação do berço irá provocar alteração no campo de tensões devido aos diferentes pontos de apoio. Assim, neste capítulo apresentar-se-á o estudo realizado utilizando o *software* Abaqus CAE versão 6.12 para verificação e melhoramento da resistência do berço.

Inicialmente será exposto um estudo realizado pelo Eng.º Eurico Emanuel Teixeira de Almeida, colaborador da EFACEC Energia, no berço com a actual configuração.

Seguidamente será então exposto o estudo realizado no berço com a nova configuração. A modelação encontra-se dividida em duas partes, correspondendo cada uma às duas posições críticas: a posição que precede o início da rotação e a posição imediatamente antes do término da rotação. Desta forma é possível dividir o berço em duas partes conseguindo assim um modelo mais leve onde é possível criar uma malha mais refinada para a obtenção de resultados mais exactos.

Por fim será analisado o campo de tensões na roda dentada e nos pinos.

### 5.1 Estudo Anterior

Previamente a este projecto foi realizado um estudo no berço com a sua configuração actual. Este estudo foi realizado pelo Eng.º Eurico Emanuel Teixeira de Almeida, actualmente ligado ao cálculo de transformadores SHELL mas aquando da realização deste estudo pertencia ao departamento R&D (*Research and Development*).

O *software* utilizado foi o COSMOSWorks™. Na Figura 60 apresenta-se o modelo.

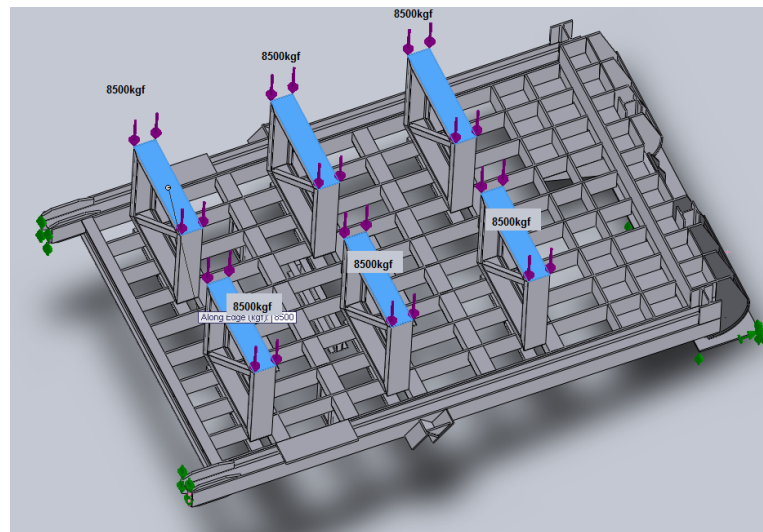


Figura 60- Modelo em COSMOSWorks™

Como se pode verificar apenas foi considerado a base do berço no momento em que a rotação se inicia. O peso da fase é representado utilizando seis cargas uniformemente distribuídas cada uma com uma carga total de 8500kgf. As condições fronteiras são fruto do esforço da ponte, através de dois apoios simples e do encastramento da chapa da base.

A distribuição de tensões foi a seguinte:

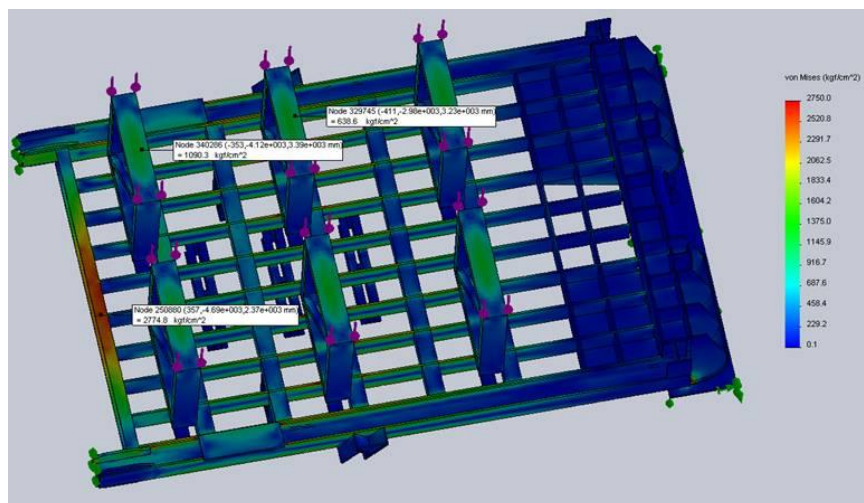


Figura 61 - Campo de tensões – estudo em COSMOSWorks™

Observando a Figura 61 podemos concluir que a tensão máxima ocorre no perfil I e é igual a  $2774,8 \text{ kgf/cm}^2$ , ou seja,  $272 \text{ MPa}$ .

Já o campo de deslocamentos pode ser visualizado na seguinte Figura:



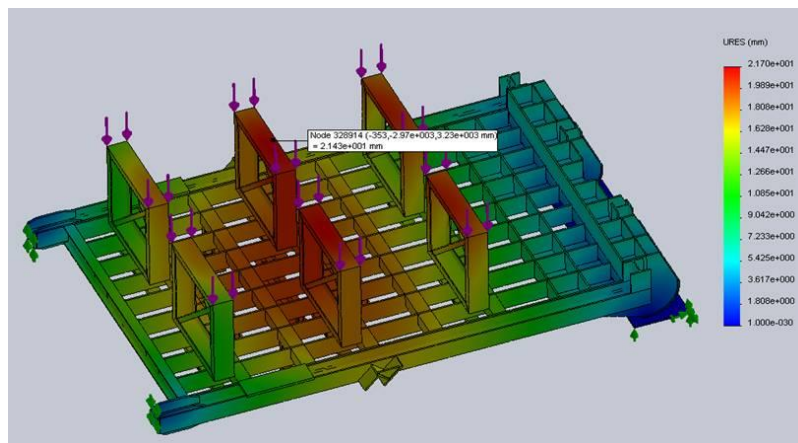


Figura 62 - Campo de deslocamentos – estudo em COSMOSWorks™

Os deslocamentos máximos ocorrem na zona central do berço com valores de aproximadamente 21mm.

As conclusões do Eng.º Eurico Emanuel Teixeira de Almeida foram as seguintes:

1. “A base do berço está estruturalmente segura para uma fase de 50 toneladas.”
2. “Os valores máximos de tensão material em toda a estrutura do berço estimam-se em cerca de  $2750 \text{ kgf/cm}^2$ ”

Com estas conclusões podemos assumir que o berço é construído num aço com uma tensão limite elástico de pelo menos 275 MPa, ou seja, um S275.

## 5.2 Modelação em ABAQUS

A constituição do berço foi apresentada detalhadamente na secção 2.1.2.1. No programa Abaqus foram utilizados elementos 3D do tipo *Solid* para facilitar o desenho e a montagem dos perfis e das chapas.

Como também foi mencionado anteriormente, optou-se por dividir a modelação do berço em duas partes:

1. A base: na qual se estudará o primeiro momento crítico, acontecendo este imediatamente depois do início da rotação onde a base suporta todo o peso da fase e os únicos apoios exteriores são os cabos da ponte e os dois pinos onde as rodas estão engrenadas;
2. A lateral: segundo momento crítico, imediatamente antes da rotação terminar onde todo o peso da fase se encontra na lateral e os apoios são os mesmo que no caso anterior.

Como o Abaqus não contém um sistema de unidades integrado, o sistema utilizado foi o SI (mm), ou seja:

Grandeza	Unidade
Comprimento	mm
Força	N
Massa	t
Tempo	s
Tensão	MPa
Energia	mJ
Massa volúmica	t/mm <sup>3</sup>

Figura 63 - Sistema de unidades utilizado

O material considerado foi um aço S275 com as seguintes características habituais (Gomes 2013):

Tensão limite Elástico ( $t \leq 40mm$ )	275MPa
Tensão de Rotura	430MPa
Coeficiente de Poisson	0.3
Massa Volúmica	7850 kg/m <sup>3</sup>

Figura 64 - Características de um aço S275

## 5.2.1 Base

### 5.2.1.1 Modelo Inicial

Na criação do modelo da base optou-se pelas seguintes simplificações:

- Substituir os apoios das fases por blocos: os apoios das fases possuem diagonais em L que dificultam muito a criação da malha. O comprimento e largura destes são iguais aos dos perfis U utilizados nos apoios e ao serem mais pesados que estes garantimos que não estamos a aliviar a carga;
- Os *fillets* dos perfis não foram desenhados;

- O desenho da roda foi bastante simplificado, apresentando apenas as suas dimensões mas não a sua geometria correcta;
- A lateral apenas foi desenhada parcialmente para se poder estudar os esforços na ligação das duas partes;
- O veio onde engata a ponte não foi desenhado.

Tendo em conta que estas simplificações não causam interferência significativa e que com elas conseguimos uma malha mais fiável, ficamos com o seguinte modelo, já com as partições para obtenção de uma boa malha.

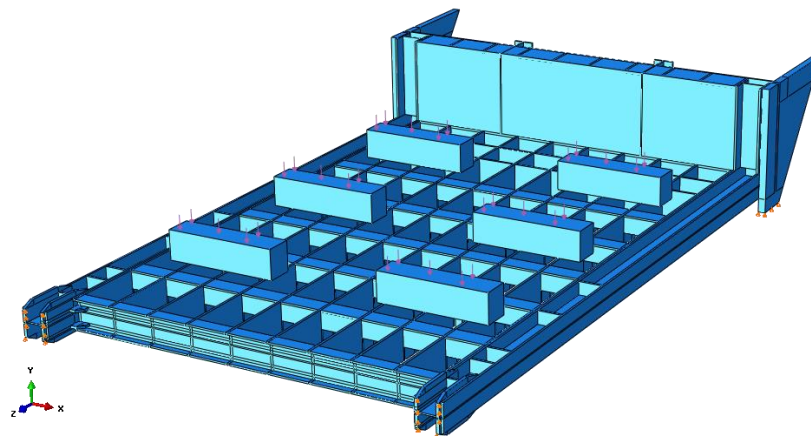


Figura 65- Modelo inicial da base (vista da frente)

Na Figura 65 conseguimos ver, para além do modelo, o carregamento e as condições fronteiras aplicados. Foi aplicada uma carga distribuída nos blocos que no total é igual a  $5 \times 10^5 \text{ N}$  ( $50t \times g \cong 5 \times 10^5 \text{ N}$ ) como mostra a Figura 66 e também foi tido em conta o efeito da gravidade (Figura 67).

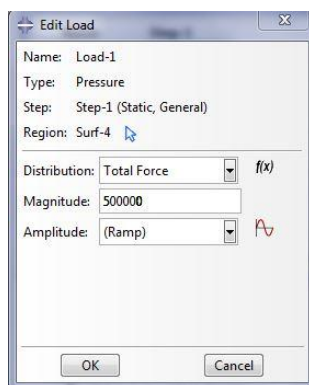


Figura 66 - Carregamento base

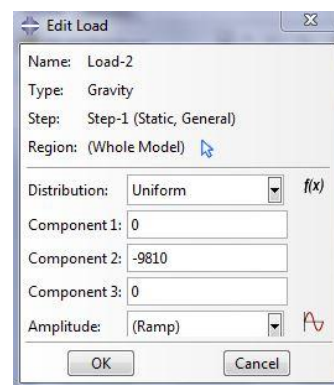


Figura 67 - Carga provocada pela gravidade

Quanto às condições fronteiras, foram considerados apoios simples impedindo os deslocamentos em Y na extremidade berço, representando os cabos (esforço da ponte), e na base da roda, representando o engrenamento.

Na vista de trás do modelo (Figura 68) pode-se ver que foram retiradas as chapas bem como o veio. Estes eram necessários para o anterior método de rotação sendo que agora não fazem sentido.

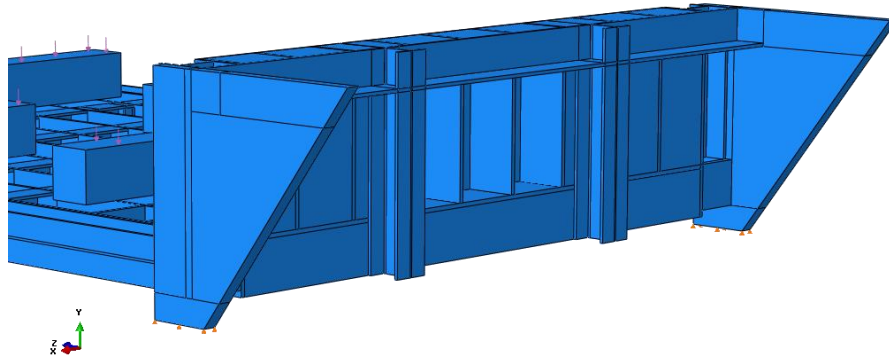


Figura 68 - Modelo inicial da base (vista de trás)

A Figura 69 mostra um pormenor da malha.

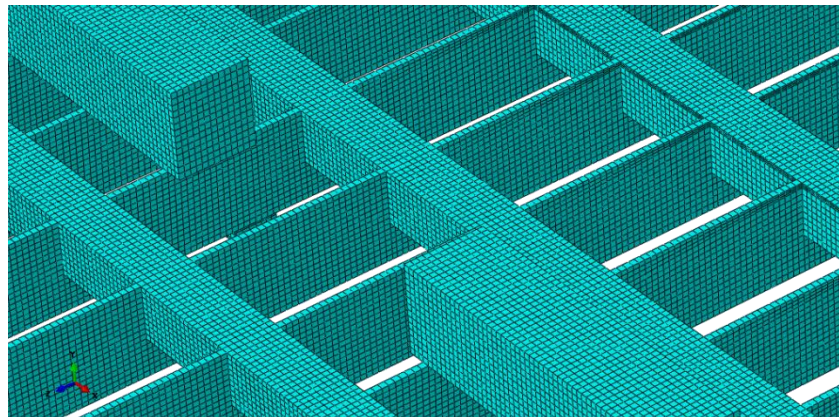


Figura 69 - Pormenor da malha na base

#### **5.2.1.2 Resultados Iniciais**

Concluída a modelação da base e criada a malha correu-se o programa. A Figura 70 apresenta a distribuição de tensões.

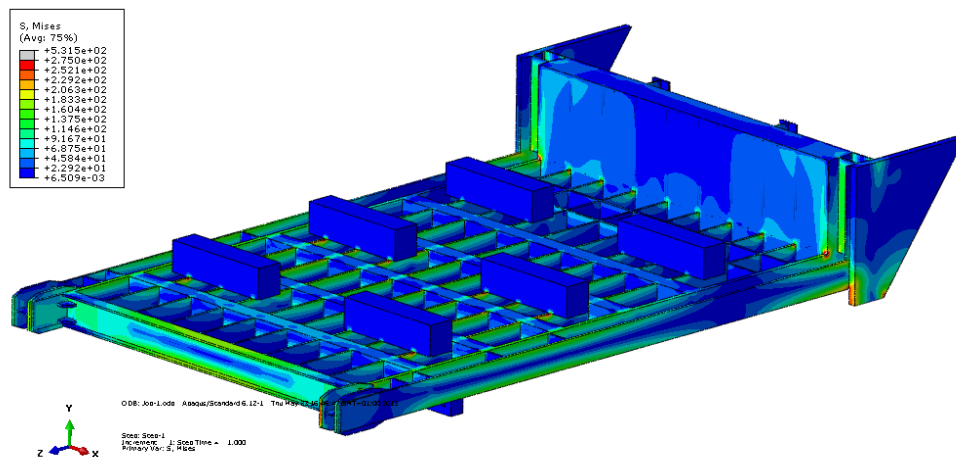


Figura 70 - Distribuição de tensões no modelo inicial da base

Como podemos ver, de uma forma geral as tensões não ultrapassam os 200MPa, no entanto a Figura 71 mostra que existem locais que ultrapassam a tensão de 275MPa, que é a tensão que estamos a considerar como de limite elástico.

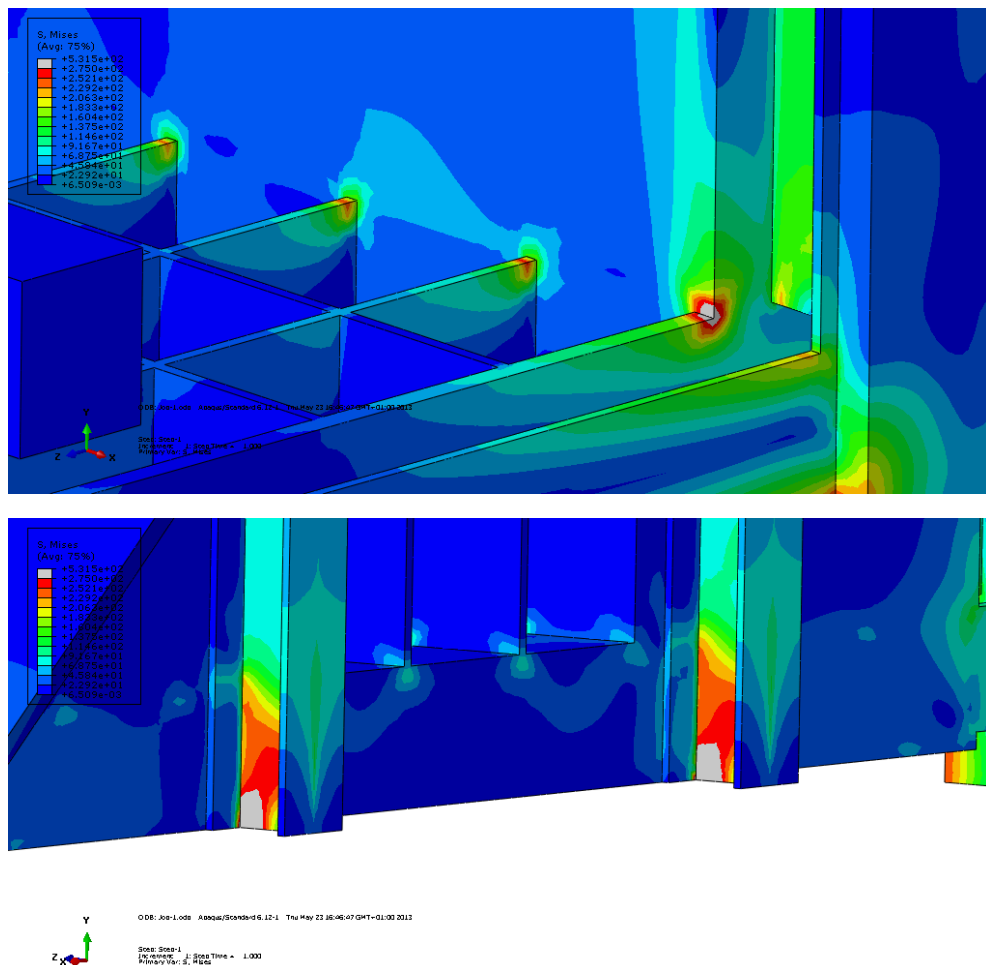


Figura 71 - Locais de concentrações de tensões superiores a 275MPa

Na escala de cor considerou-se o máximo 275MPa, sendo que as zonas a cinzento são zonas que entrariam em regime plástico. Verificamos assim que o berço tenderá a “fechar-se” sobre si próprio atingindo-se valores de 530MPa, que ultrapassa até a tensão de rotura do aço em questão. Ainda que durante a viragem da fase seja colocado um travamento (Figura 72), vamos procurar garantir que o berço é funcional sem o travamento em questão e que este apenas adiciona uma segurança extra.



Figura 72 - Travamento do berço

### **5.2.1.3 Modelo Final**

Como descrito na secção anterior, a actual configuração do berço não garante a integridade estrutural do berço. Para tentar colmatar este problema vamos recolocar as chapas sobre as quais se dava a rotação e que tinham sido retiradas pois já não teriam utilidade. Desta forma a sua função deixa de estar relacionada com o movimento e passa a ter apenas funções estruturais. Por forma a simplificar a malha estas vão ser desenhadas com a mesma espessura que as reais, mas em forma de “L” e com dimensões mais reduzidas de forma a garantir que estamos a conservar a segurança do modelo. Desta modo o modelo toma a seguinte forma:



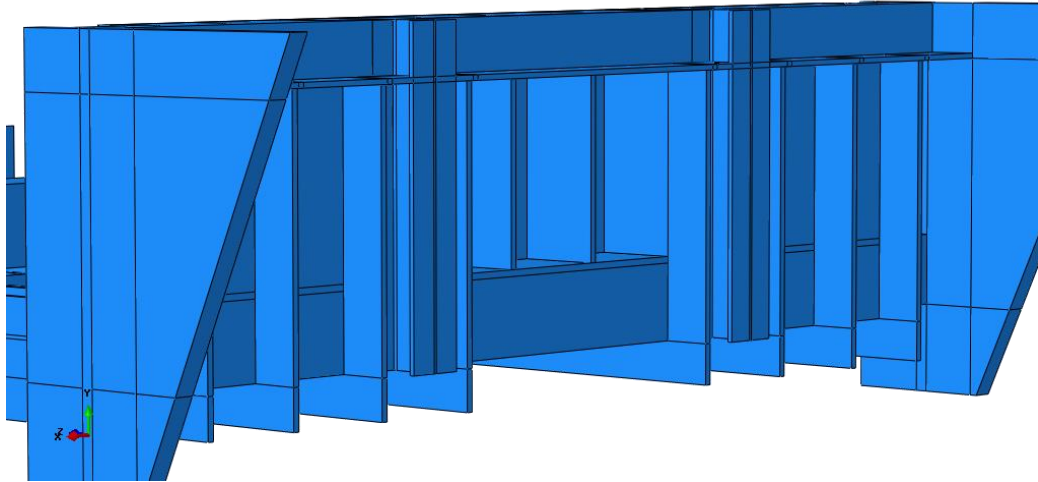


Figura 73 - Modelo final da base (vista de trás)

As condições de fronteira e os carregamentos não foram alterados.

Na Figura 74 apresenta-se a malha na zona alterada.

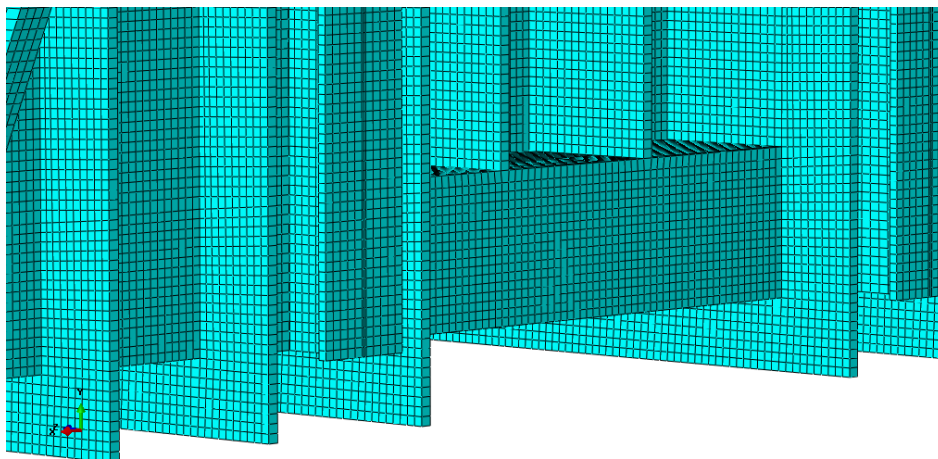


Figura 74 - Malha na zona das chapas

### ***5.2.1.3 Resultados Finais***

De seguida apresenta-se a distribuição de tensões ao longo do berço.

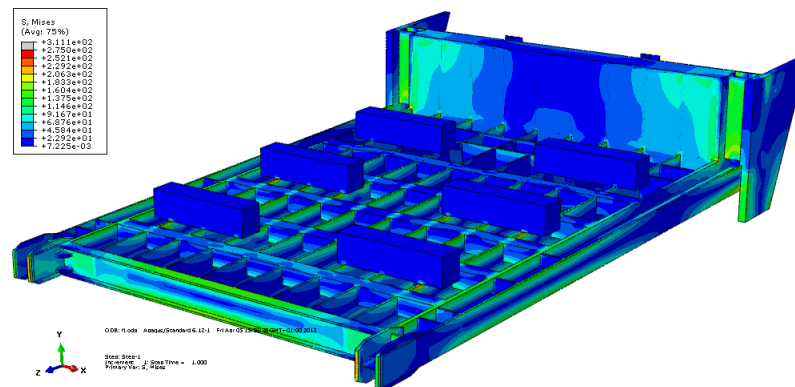


Figura 75 - Distribuição de tensões no modelo final da base

Com a Figura 75 podemos concluir que de uma forma global a distribuição de tensões se encontra idêntica à anterior. Vamos então analisar os pontos críticos do modelo anterior.

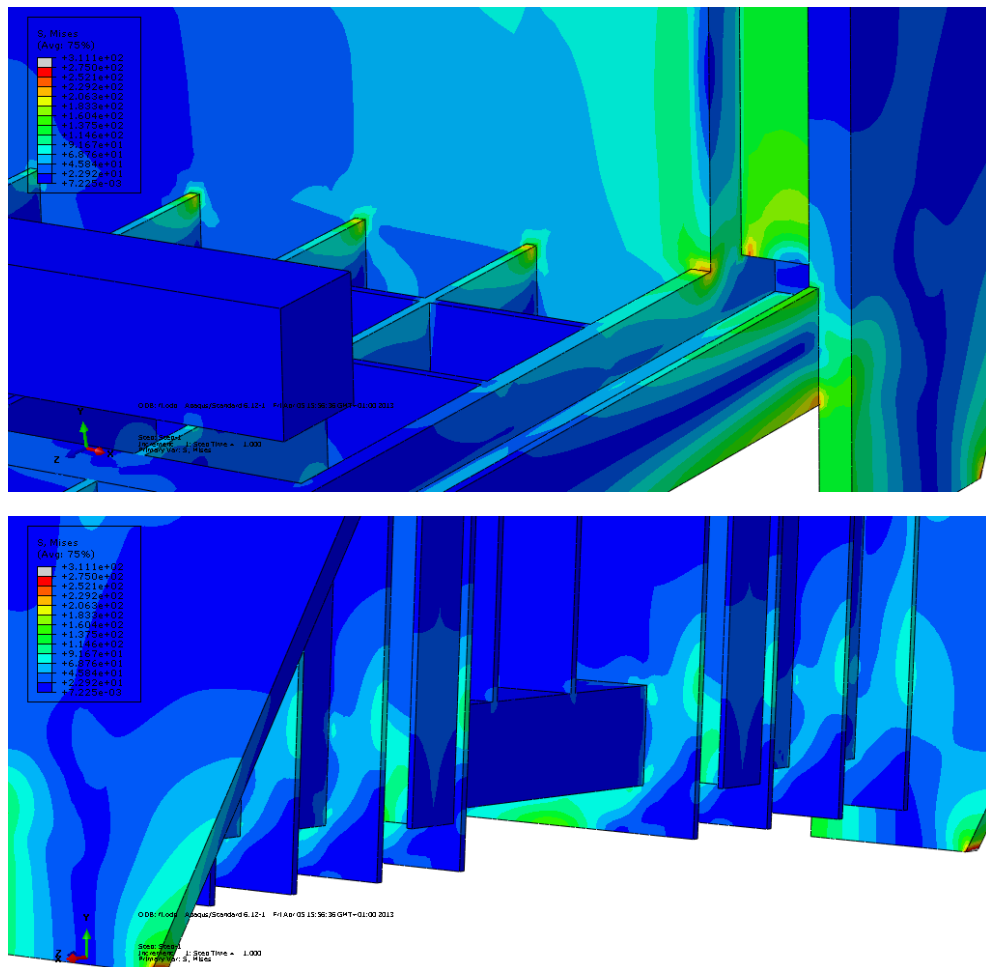


Figura 76 – Pormenores das anteriormente críticos

Sendo que a Figura 76 mostra em pormenor as mesmas zonas representadas na Figura 71, utilizando a mesma escala nas cores, podemos verificar que, desta forma, as zonas submetidas a tensões superiores a 275MPa desapareceram não se atingindo valores superiores a 250MPa.



Na Figura 77 é apresentado o campo de deslocamentos da base do berço.

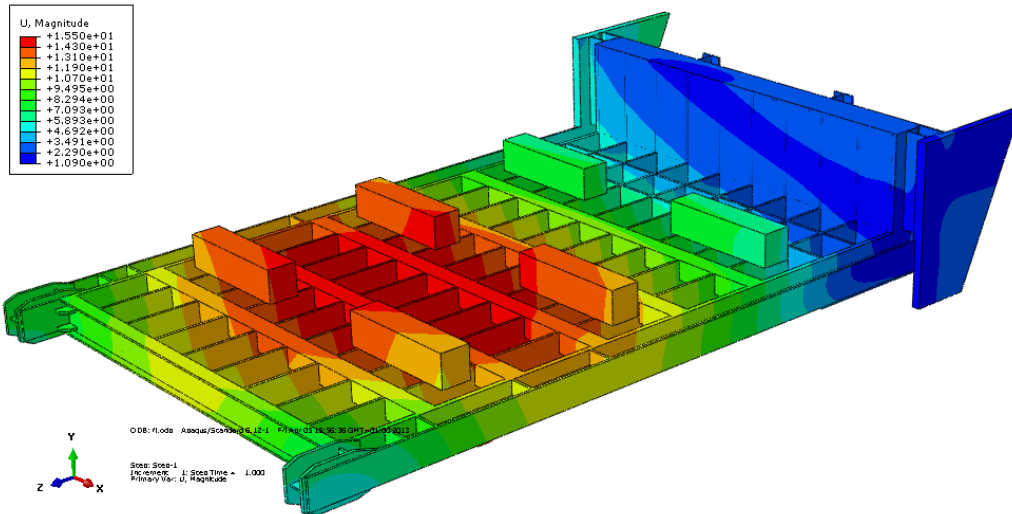


Figura 77 - Campo de deslocamentos na base do berço

Os deslocamentos máximos são de 15mm e ocorrem na zona central do berço.

Conseguimos desta forma aliviar as tensões, ficando assim uma base do berço estruturalmente capaz de suportar as 50 toneladas sem necessidade de adicionar novos reforços.

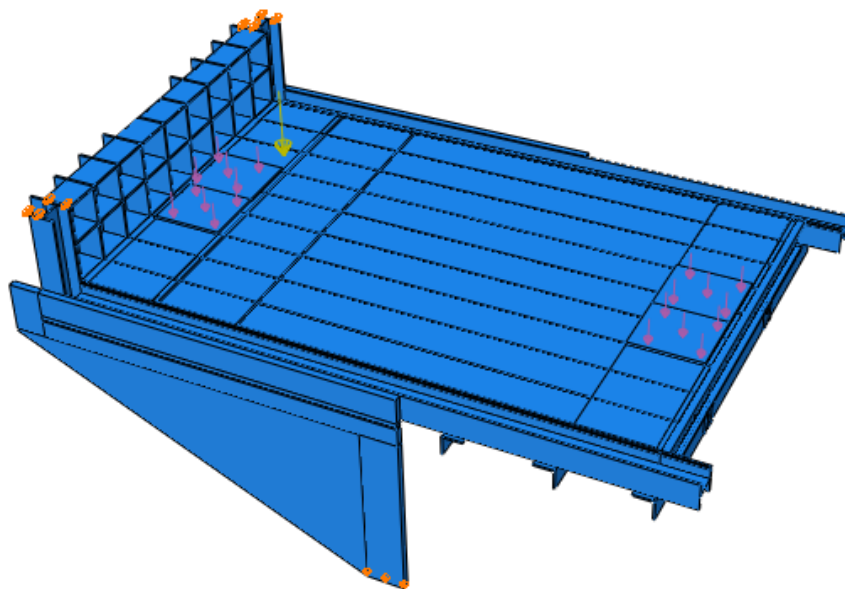
## 5.2.2 Lateral

### 5.2.2.1 Modelo Inicial

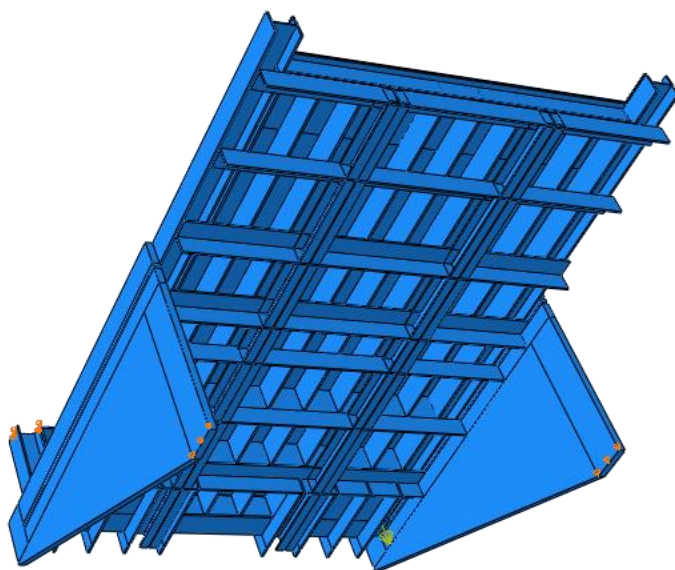
Na modelação por elementos finitos da lateral também foram consideradas certas simplificações:

- Os *fillets* dos perfis não foram desenhados;
- O desenho da roda foi bastante simplificado, apresentando apenas as suas dimensões mas não a sua geometria correcta;
- A base apenas foi desenhada parcialmente para se poder estudar os esforços na ligação das duas partes e representar a condição fronteira relativa à ponte;
- Para a aplicação da carga, isto é, do peso da fase, foram colocados dois pares de chapas.

O modelo pode ser observado na Figura seguinte.



a)



b)

Figura 78 – Modelo inicial da lateral: a) vista de frente; b) vista de trás

Na Figura 78 é visível também o carregamento e as condições fronteiras. De forma idêntica à modelação feita na base, o carregamento corresponde a uma carga distribuída de intensidade total 500kN assim como as condições fronteira remetem para apoios simples na zona de

contacto da roda com o carril, mas aqui optou-se por colocar apoios duplos no local que corresponde ao apoio da ponte rolante.

Uma vez que com uma imagem global do modelo não seria possível apresentar a malha devido à pequena resolução desta face ao tamanho do berço, apresenta-se apenas um pormenor desta.

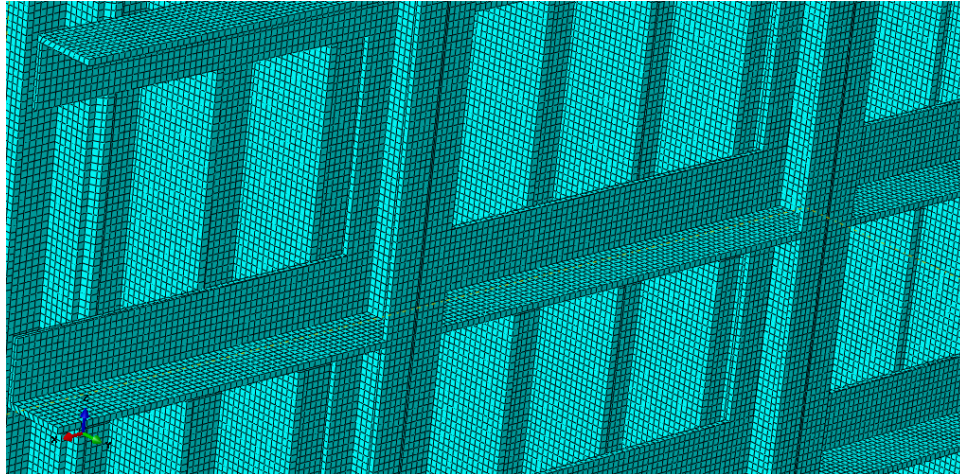
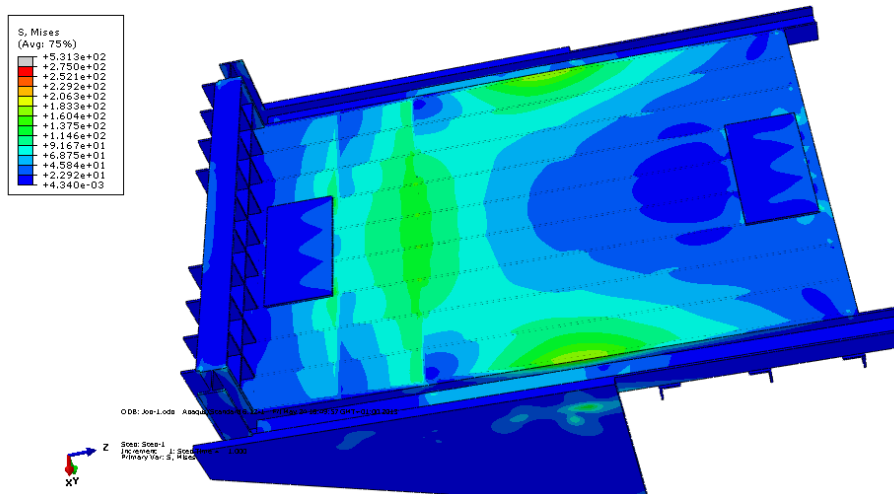


Figura 79 - Pormenor da malha no modelo inicial da lateral

### 5.2.2.2 Resultados Iniciais

De seguida apresenta-se a distribuição de tensões no berço resultado da modelação acima apresentada.



a)

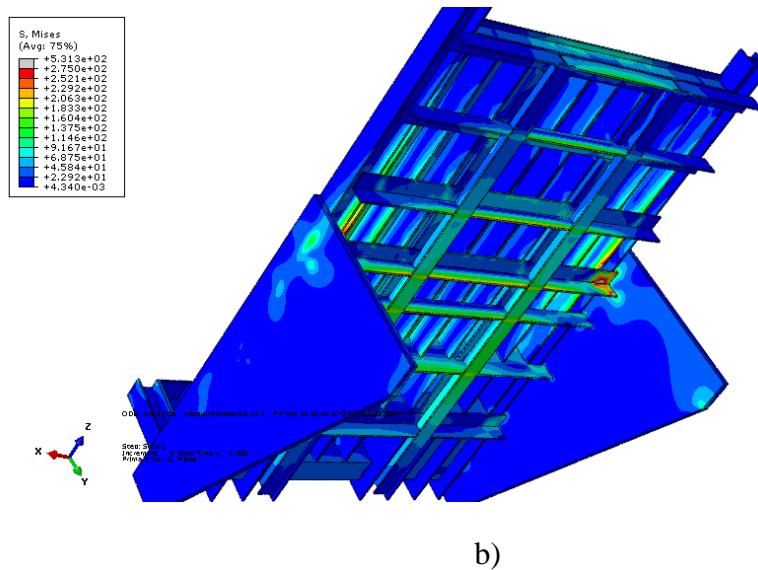


Figura 80 – Distribuição de tensões na lateral no modelo inicial: a) vista de frente; b) vista de trás

A escala de cores utilizada é igual à utilizada anteriormente, ou seja, o vermelho remete para tensões próximas da tensão de limite elástico considerada (275MPa), sendo que o cinzento mostra as zonas que ultrapassam esse valor.

A vista de frente não apresenta qualquer problema, no entanto, na vista de trás conseguimos ver algumas zonas a cinzento, ou seja, que entrariam em regime plástico. A Figura 81 apresenta essas zonas em pormenor.

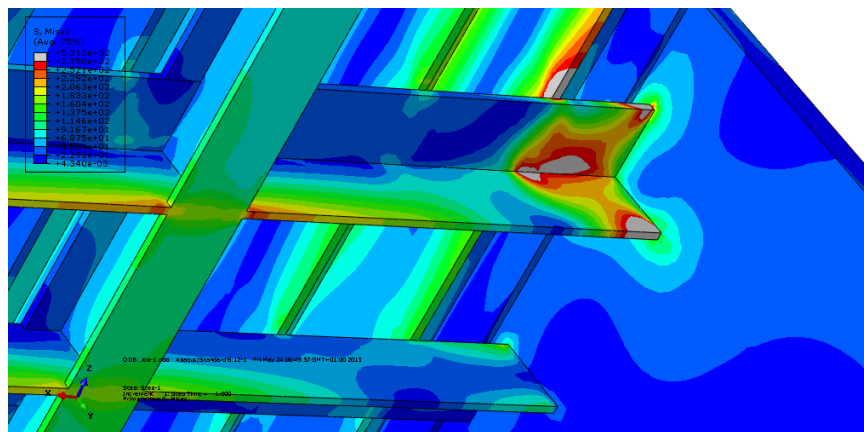


Figura 81 - Pormenor das zonas críticas no modelo inicial da lateral

Da análise da Figura 81 conclui-se que é necessário reforçar tanto o perfil L, como a chapa de 16mm e o perfil H, pois todos estão sujeitos a elevados valores de tensões, chegando mesmo a valores como 531MPa. Na secção seguinte ver-se-á como corrigir este problema.

### 5.2.2.3 Modelo Final

Estão então conhecidas as áreas que põem em risco a integridade estrutural do berço na segunda fase crítica da rotação, isto é, no momento que antecede o término da viragem da fase.

Foram feitas várias tentativas de encontrar uma solução que não comprometesse a integridade estrutural do berço. A Figura seguinte procura mostrar com alguma clareza os reforços adicionados:

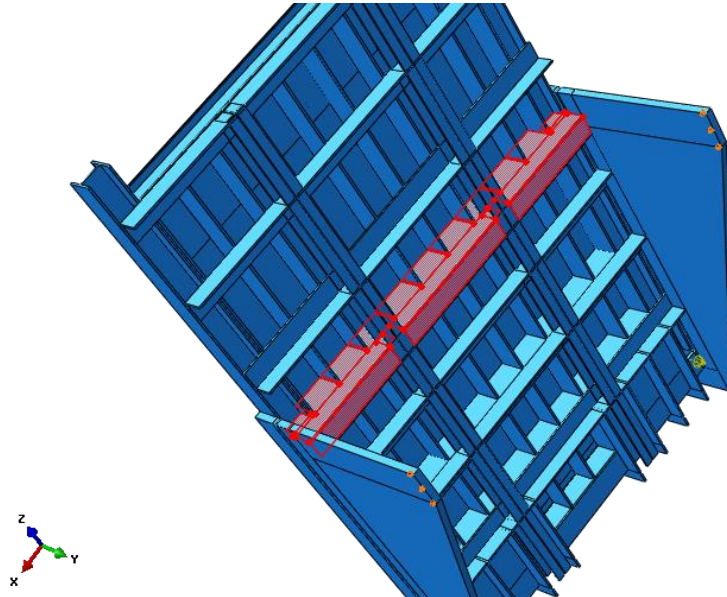


Figura 82 - Berço reforçado (reforços a vermelho)

Observando em pormenor:

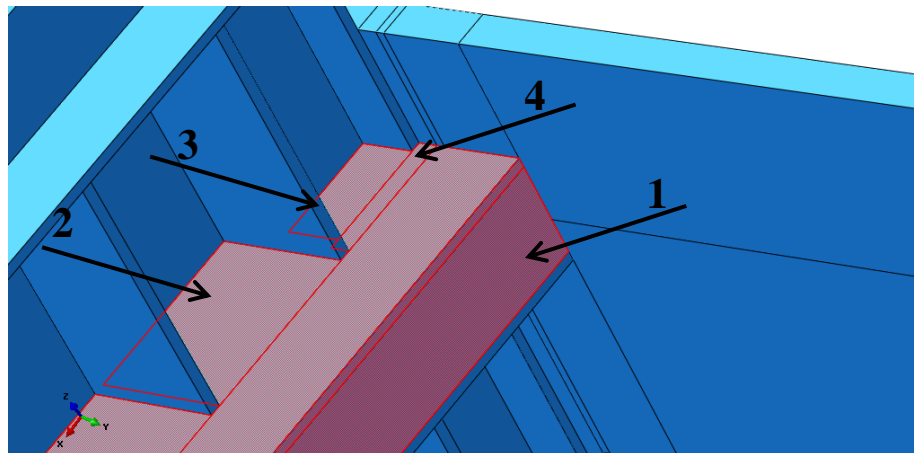


Figura 83 - Pormenor dos reforços juntos à roda (reforços a vermelho)

Os reforços consistem no seguinte:

1. Perfil em L soldado ao perfil L já existente transformando-o num perfil tubular quadrado;
2. Chapa de 16mm para reforço do perfil tubular (antes só em L) e das chapas longitudinais;
3. Chapa de 30mm para reforço do perfil lateral H;



4. Chapa de 30mm a toda a altura do perfil tubular que permite tanto reforçar este, como a primeira chapa longitudinal como o perfil H.

De referir ainda que os reforços 1 e 4 têm também outro grande objectivo que não os explicitados atrás; Aumentar substancialmente a área de soldadura da roda à restante estrutura do berço.

#### 5.2.2.4 Resultados Finais

Apresenta-se de seguida os resultados da modelação apresentada anteriormente.

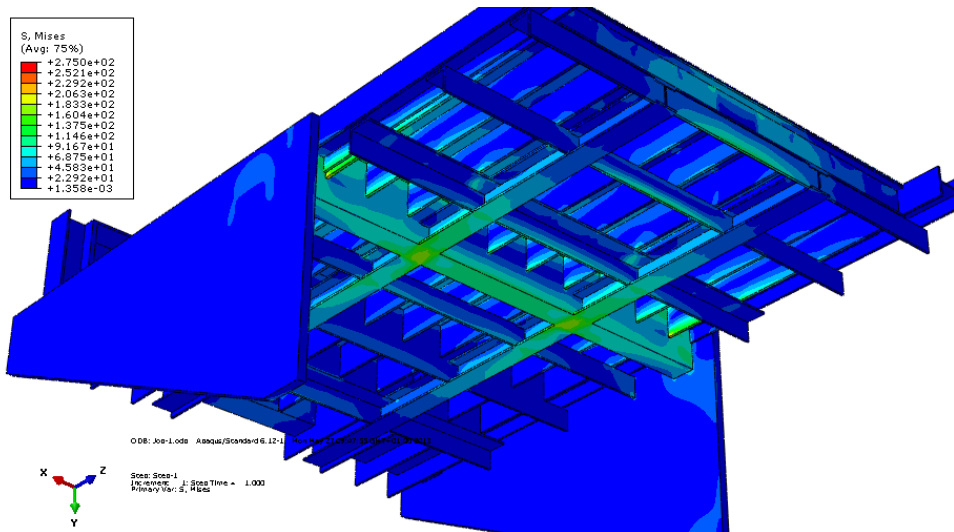


Figura 84 - Modelo final, distribuição de tensões

Observando apenas a zona crítica concluímos que não temos qualquer ponto que ultrapasse a tensão de 275MPa. A Figura 85 revela esta situação.

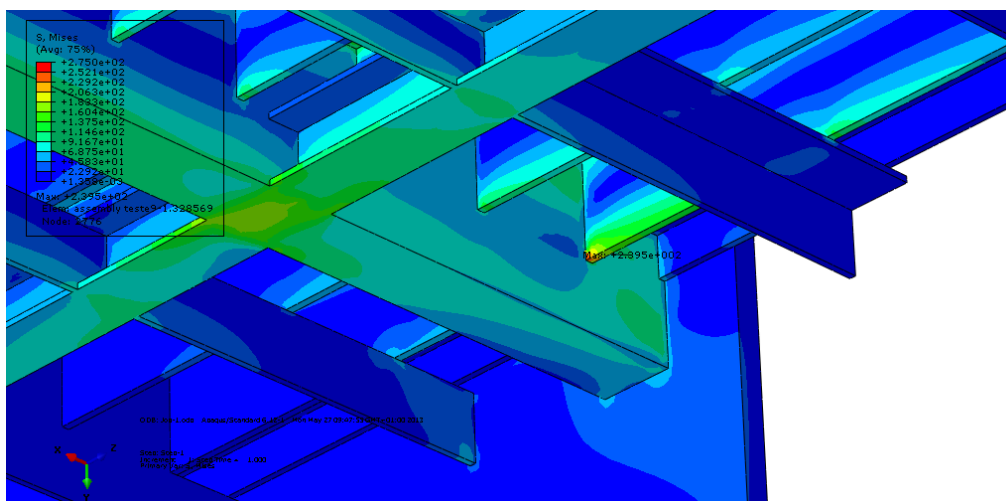


Figura 85 - Modelo final, distribuição de tensões, pormenor

Para finalizar a modelação da lateral adicionou-se um travamento extra entre as rodas, unido também à restante estrutura do berço como mostra a Figura seguinte.

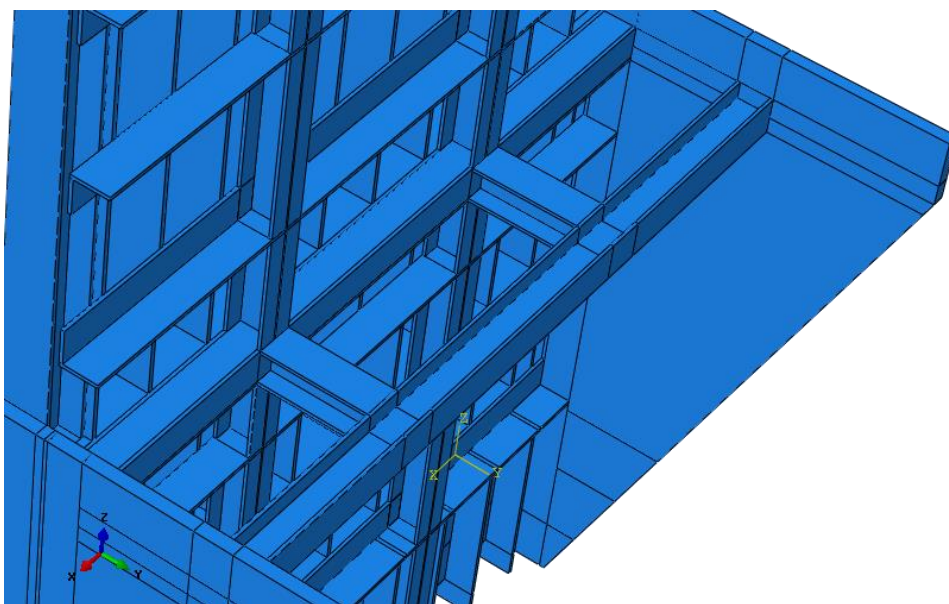


Figura 86 - Modelo final com travamento entre as rodas

Este travamento extra consiste num perfil HEB 140 entre cada uma das rodas, ligado aos dois perfis HEB 140 da estrutura do berço, também por dois perfis iguais.

Os resultados obtidos através deste modelo foram os seguintes.

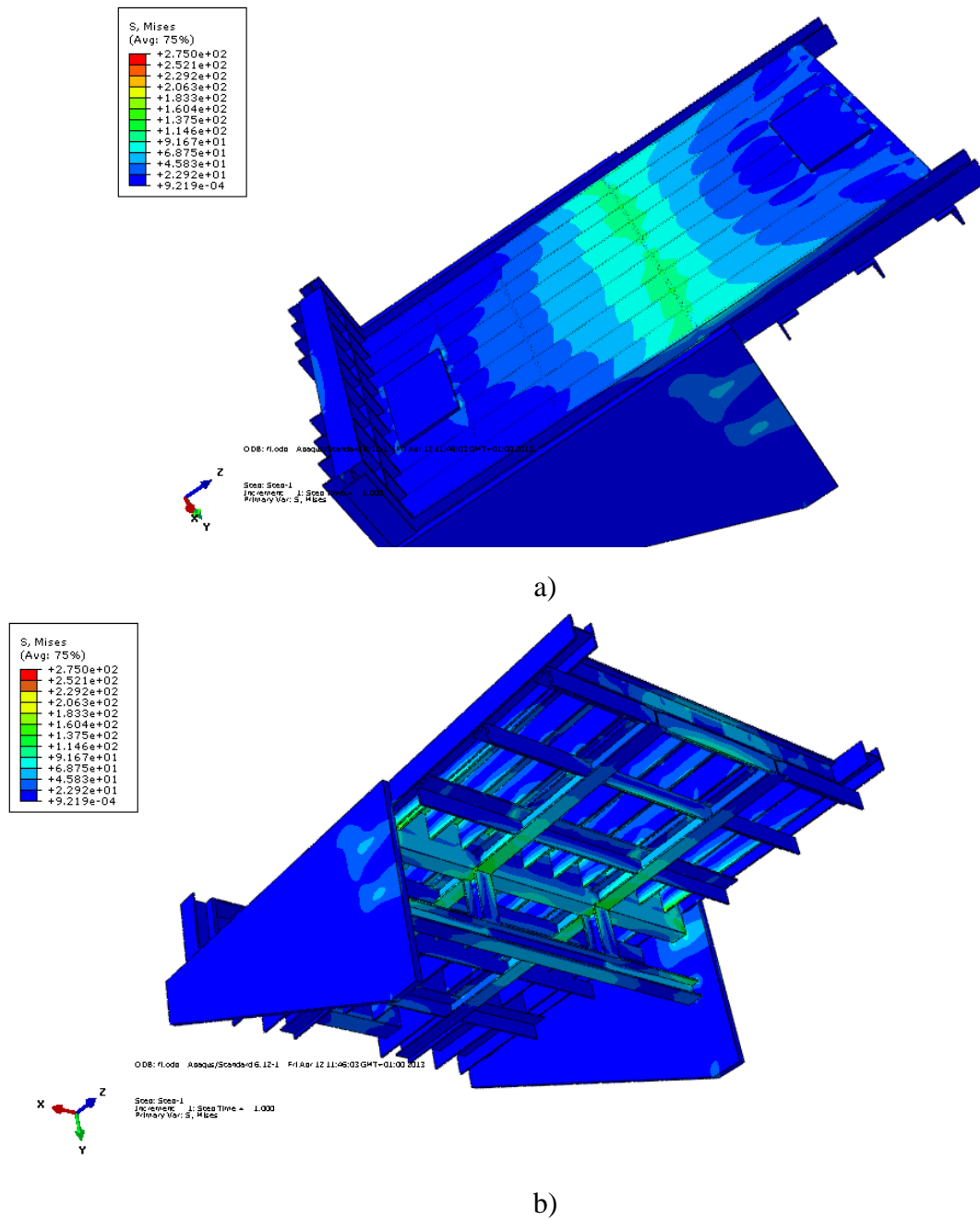


Figura 87 - Distribuição de tensões na lateral no modelo final, com travamento: a) vista de frente; b) vista de trás

Observando em pormenor:



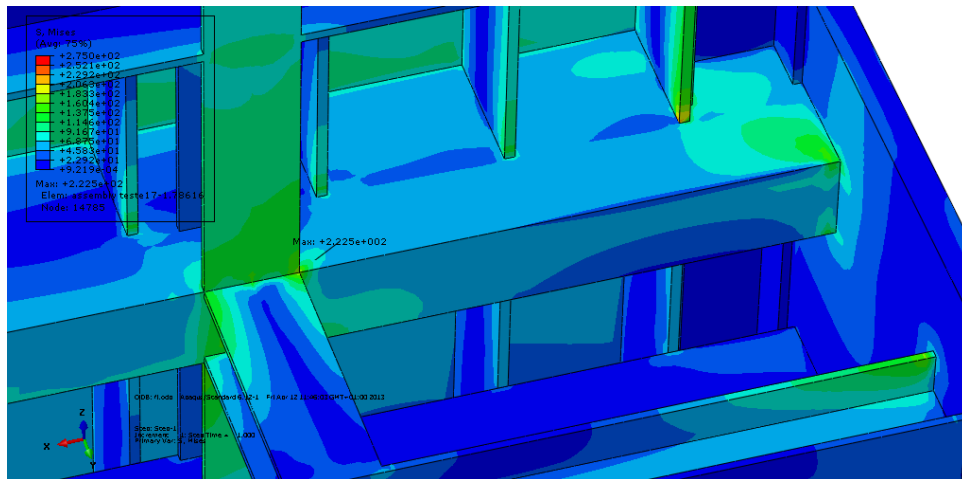


Figura 88 - Modelo final com travamento, distribuição de tensões, pormenor

Como se pode observar, a tensão máxima a que o berço está submetido é de 222,5MPa, contra os 239,5MPa da Figura 85. Ainda que este ganho não seja propriamente significativo, a adição deste travamento extra induz, para além de um alívio de tensões, uma maior segurança no caso de uma utilização imperfeita da ponte e, assim, o berço ser submetido a esforços que não seriam espectáveis numa viragem ideal. Desta forma vai se optar por colocar este travamento.

Através da Figura 89 conseguimos ver o campo de deslocamentos do berço. A região sujeita a maiores deslocamentos é a região superior onde se atinge valores de 11mm.

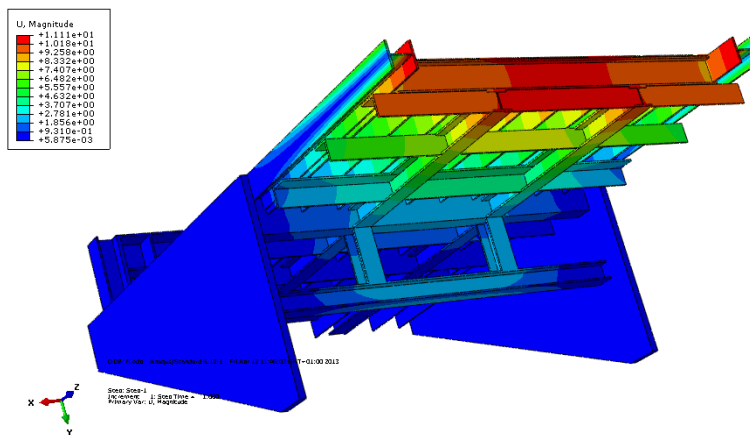


Figura 89 - Deslocamentos modelo final

### 5.2.3 Roda

Foi também realizada uma verificação na roda da distribuição de tensões na zona de contacto desta com o carril. Para isso criou-se um modelo com o desenho de apenas um dente, aplicando uma carga distribuída onde seria a zona de contacto de valor igual a metade do peso

da fase. Considerou-se um encastramento na zona que estaria ligada à restante estrutura do berço, como mostra a seguinte Figura.

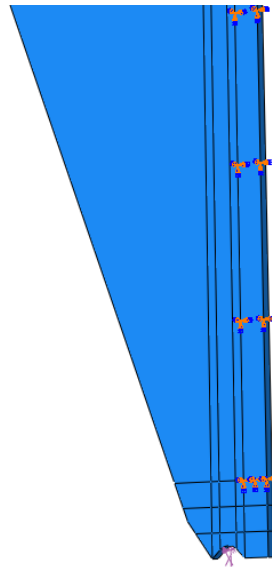


Figura 90 - Modelo da roda

Os resultados obtidos foram os seguintes:

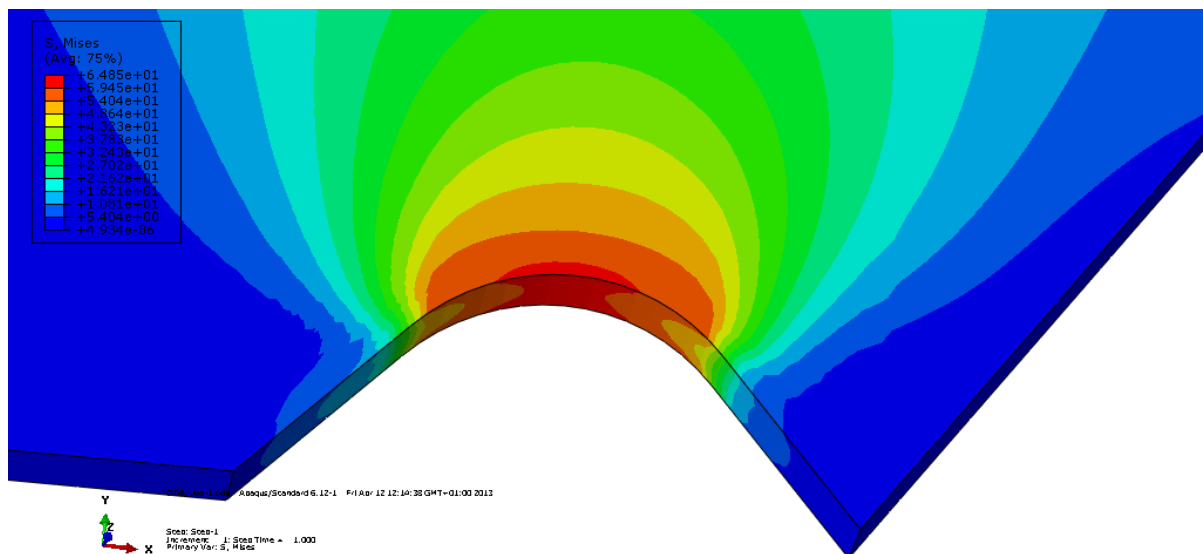


Figura 91 - Campo de tensões na zona de contacto da roda

Como valores de tensão máximos de 65MPa verificamos que estamos longe da tensão de limite elástico do material.

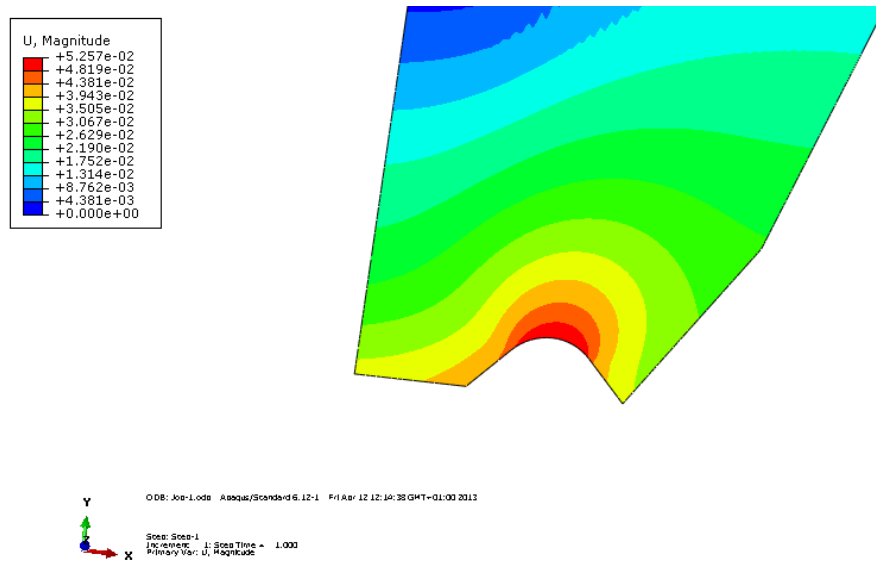


Figura 92 - Campo de deslocamentos na roda

Sendo o deslocamento máximo igual a  $52\mu\text{m}$ , também aqui não existem problemas.

## 5.2.4 Carril

Além da estrutura do berço e da roda, analisou-se o que acontece a um pino na estrutura do carril quando submetido a uma carga distribuída de valor igual a metade do peso da fase. Considerando a base encastrada, ficamos com o seguinte modelo:

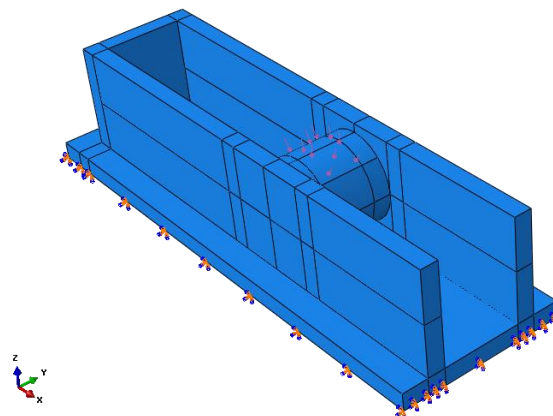


Figura 93 - Modelo de um pino no carril

A distribuição de tensões obtida foi a seguinte:

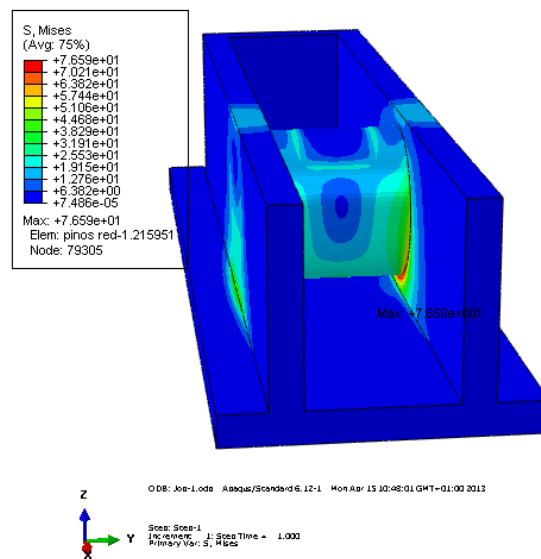


Figura 94 – Campo de tensões no carril

Visto em corte para se melhor perceber o que acontece na zona mais crítica:

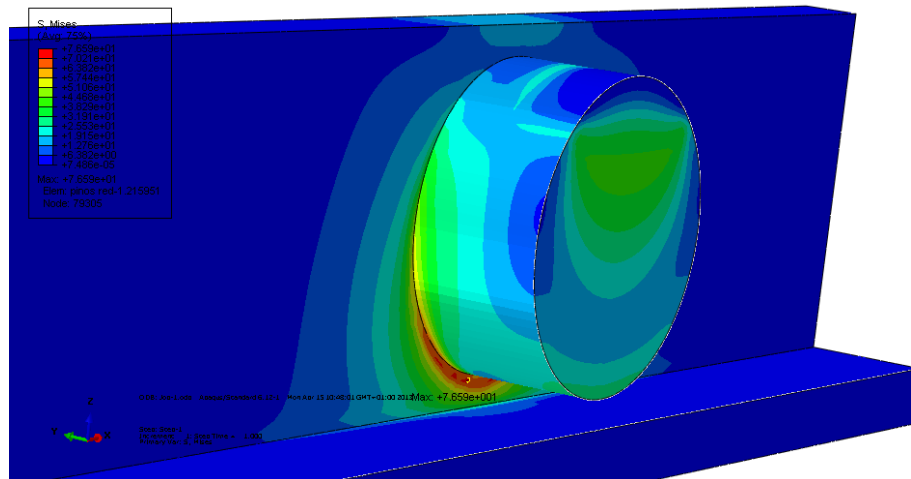


Figura 95 - Campo de tensões no carril, vista em corte

A tensão máxima é de 77MPa, portanto também se encontra longe das capacidades máximas do aço em questão.

Quanto ao deslocamento também não existem valores que possam ser considerados relevantes, dado que não são ultrapassados os 30µm.

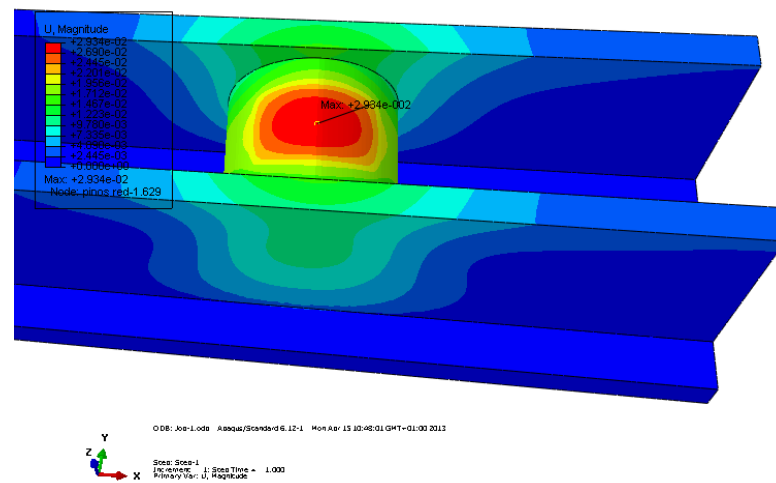


Figura 96 - Campo de deslocamentos do carril



## 6 Projecto do Berço e Componentes

Concluída a análise da estrutura do berço urge agora a necessidade de explicar de que forma serão montados os reforços. Além disso será apresentado o projecto final da roda tendo, desta vez, em conta toda a estrutura do berço com os novos reforços assim como com o próprio peso da roda e da fase.

Para concluir será apresentado o projecto dos componentes do berço, sendo estes os apoios de fases que foi reduzido para metade da altura, e o apoio para impedir a rotação do berço em sentido contrário no final desta.

De referir que para o berço e para cada componente foi efectuado um desenho de conjunto e de execução onde são especificados os locais de soldadura e clarificada a montagem das peças. Foi ainda desenhado, para cada componente, um desenho de detalhe onde são especificados os chanfros para permitir a penetração da soldadura. Estes desenhos não estão presentes neste relatório pois a sua existência torná-lo-ia demasiado longo e volumoso.

O processo de soldadura previsto será a soldadura MIG (Metal Inert Gas).

As superfícies deverão ser decapadas com uma granalha de aço de grau SA2 – ½ (segundo norma ISO 8501:1 – 2007 - Pictorial Surface Preparation Standards for painting steel surfaces). Nesta decapagem o jacto é mantido por tempo suficiente para assegurar a remoção da laminação, ferrugem e partículas estranhas, de tal modo, que apenas possam aparecer leves sombras, listras ou descoloração na superfície. No final, cerca de 95% da peça deve estar livre de resíduos e a superfície deverá apresentar cor cinza claro como indica a Figura seguinte (Metalização 2013).

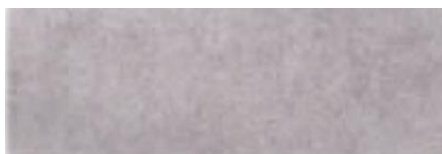


Figura 97 – Decapagem - granalha de Aço grau SA2 – ½

Posteriormente será usado um primário epóxi rico em zinco que é constituído por primário epóxi curado com poliamida e pigmentado com pó de zinco. Conseguindo-se (Robbialac 2013):

- Boa resistência;
- Boa protecção anticorrosiva;
- Secagem rápida;
- Operações de soldadura.

Deverá ser usado após a decapagem anteriormente referida e a espessura quando seca deverá ser de 40µm (Robbialac 2013).

Por fim a tinta utilizada será uma tinta de esmalte com cor de referência RAL 1003 (amarelo), dado ser a cor actual do berço.

## **6.1 Berço**

### **6.1.1 Execução das alterações**

Como já foi visto, este berço consiste numa construção soldada e, por essa razão, faz todo o sentido que os novos reforços sejam, também, soldados à estrutura.

A Figura 98 explicita um desenho 3D do berço. A amarelo encontram-se os constituintes existentes e a cinzento os novos reforços e as rodas dentadas. Assim, e tendo como base a Figura 98, será feito um resumo do local de montagem e qual a utilidade de cada um dos reforços, clarificando de como será executado este projecto.



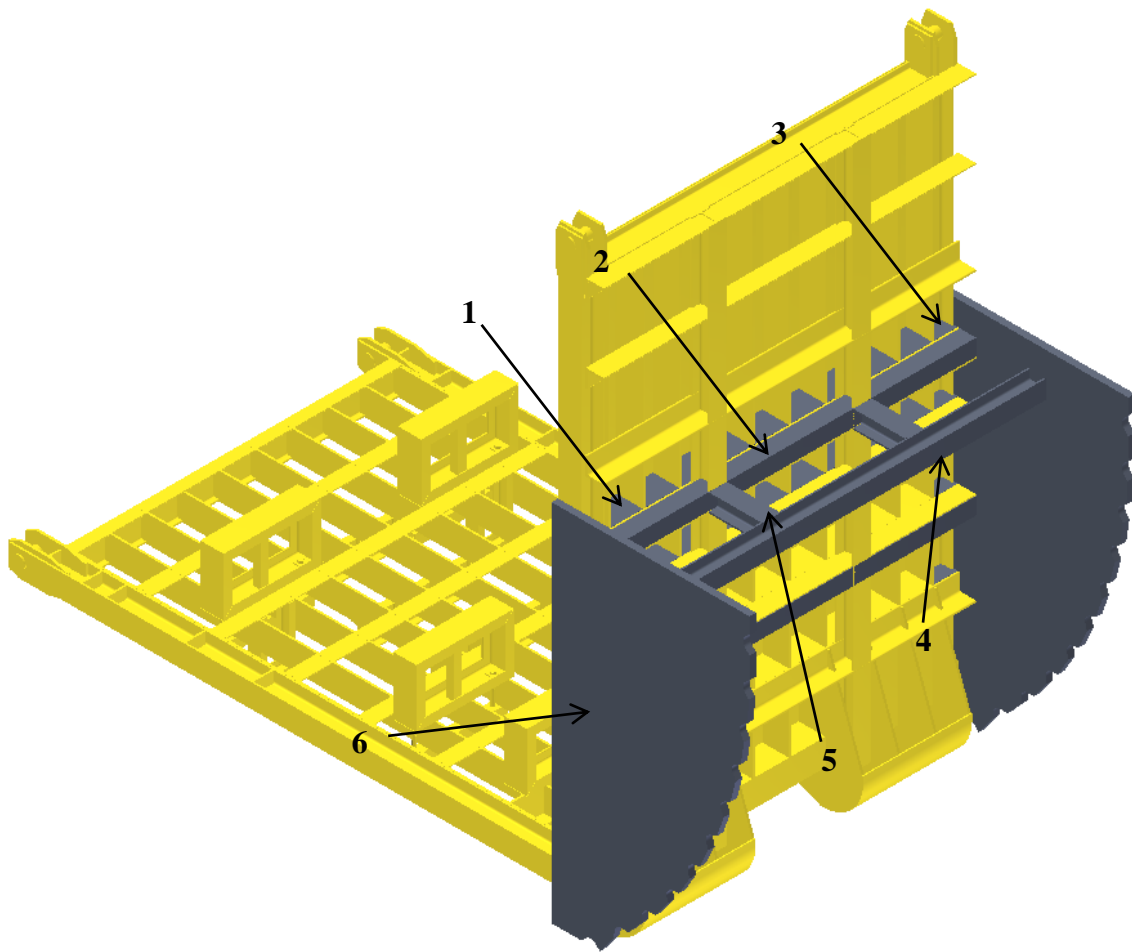


Figura 98 - Desenho 3D do berço com os novos reforços a cor diferente

1. Chapas transversais que servem de reforço tanto às chapas longitudinais como aos perfis tubulares (antes em L). Os dois primeiros perfis L inferiores já possuem estas chapas pelo que apenas devem ser adicionadas aos restantes dois que ainda se situam ao nível da roda. Para a montagem, devem ser divididas em várias chapas de forma a colocar-se no devido lugar, aplicando soldadura em todo o seu redor.
2. O objectivo principal deste reforço é transformar os perfis L já existentes, em perfis tubulares quadrados. Desta forma é possível reforça-los e aumentar a área de ligação à roda. Os perfis a reforçar são os L que se encontram ligados à roda com excepção do primeiro dado que este não é submetido a uma carga tão elevada e, além disto, já se encontra reforçado pelas chapas que unem as duas partes do berço. Este reforço é constituído por duas chapas soldadas em forma de L pois só assim é possível obter um perfil tubular quadrado. Deve ainda ser dividido em três com devidos recortes para penetrar nos perfis HEB centrais. Estes encontram-se soldados ao perfil L existente, aos perfis HEB centrais e também às rodas dentadas.

3. Este reforço pretende preencher um vazio numa zona de elevada concentração de tensões. Consegue-se assim reforçar tanto o perfil tubular, como o HEB lateral e a chapa transversal, aumenta-se também a zona de ligação da roda à restante estrutura do berço. É constituído por duas chapas de 30mm soldadas como mostra a seguinte Figura 99 e montadas de ambos os lados do berço e ao nível de todos os perfis tubulares ligados à roda. A soldadura deverá ser feita ao interior do perfil HEB e ao perfil tubular.

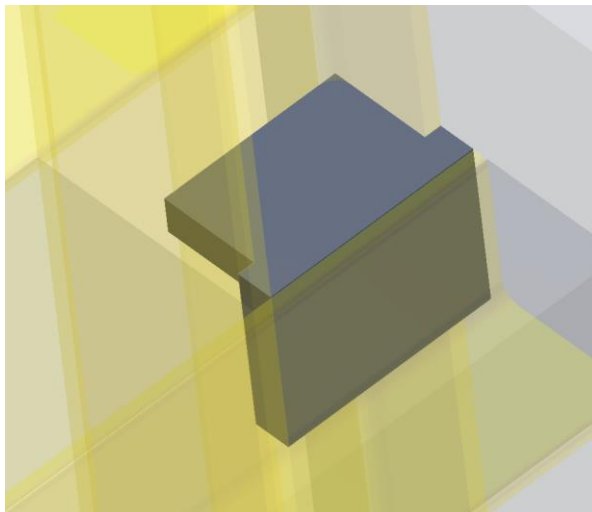


Figura 99 - Pormenor do reforço 3

4. Perfil HEB140 cuja função é criar um travamento extra entre as duas rodas. Como vimos na secção 5.2.2.4, este travamento era dispensável tendo em consideração uma utilização ideal e perfeita da ponte rolante, que não produzisse esforços transversais ao movimento de rotação do berço. Desta forma, com este travamento, além de aliviar ligeiramente as tensões na estrutura, induzimos uma segurança extra em situações imprevistas. Este perfil deverá ser soldado a cada uma das rodas e ao reforço 5 que veremos a seguir.
5. Corresponde a dois perfis também HEB 140 que permitem ligar o travamento 4 à estrutura do berço, nomeadamente aos dois perfis também HEB 140 que o berço já possuía. Assim, estes são soldados tanto ao perfil de travamento extra das rodas, como ao perfil HEB 140 anteriormente referido.
6. Este é o principal componente deste projecto. É através dele que se conseguirá alterar o modo de funcionamento do actual berço. A boa ligação desta peça com toda a estrutura é fundamental devendo por este motivo ter especial atenção à consistência dos cordões de soldadura e garantindo boa penetração em todos os locais de contacto, os dois perfis HEB 180 (da lateral e da base), o reforço 3, os perfis tubulares e o travamento extra (reforço 4).

### 6.1.2 Desenho Final da Roda

Finalizadas as alterações ficamos, agora, com todos os requisitos necessários para se poder calcular o verdadeiro centro de massa do berço incluindo já os novos reforços e a própria roda. Para a obtenção do centro de massa desenhou-se o berço em Inventor® como mostrou a Figura 98. O centro de massa do actual berço está indicado na Figura 100.

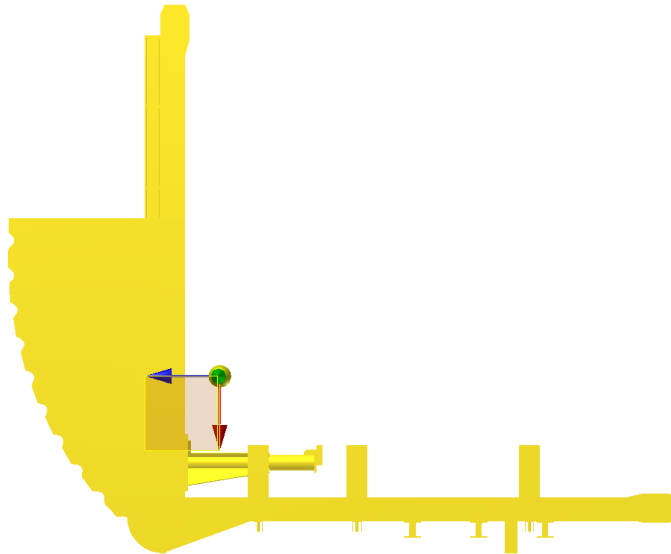


Figura 100 - Posição do centro de massa do berço

Calculou-se então o centro de massa do conjunto, representado na Figura 101. Nesta Figura a roda não está desenhada, pois o objectivo é redesenhá-la, mas foi tido em conta o peso da última desenhada.

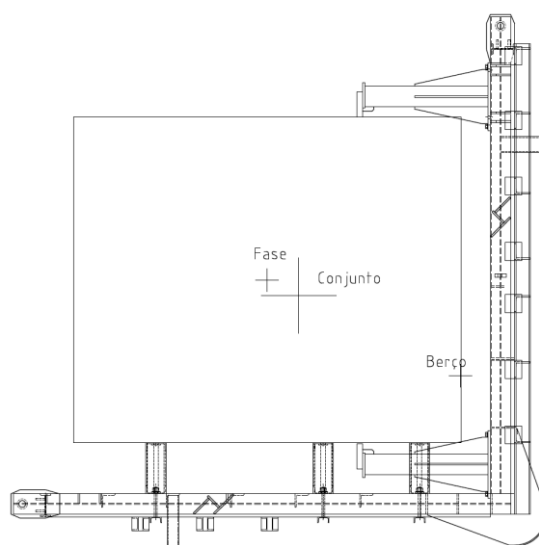


Figura 101 - Localização do centro de massa

Foi então redesenhada a roda em AutoCAD®, conforme descrito na secção 4.2.3 e ficamos com o seguinte berço + fase.

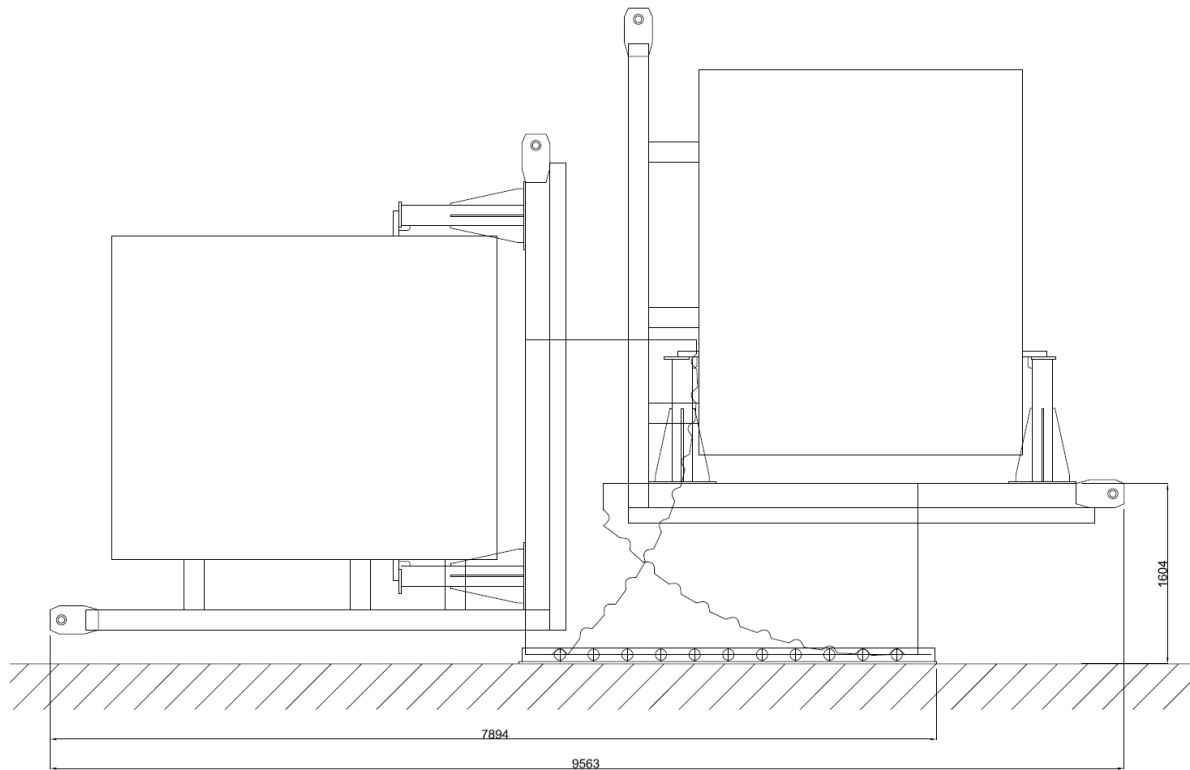


Figura 102 - Desenho final do berço

Por fim redesenhou-se a roda em Inventor® e verificou-se que o centro de massa praticamente não sofreu alterações. Ainda assim confirmou-se que esta ligeira alteração não interfere com o bom funcionamento do berço. A altura máxima passou de 1600mm, vista na secção 4.2.4, para 1604mm, ou seja manteve-se praticamente inalterada com os novos reforços, pelo que, como foi dito, a modelação em MEF pode ser considerada válida.

## 6.2 Apoios da Fase

Como vimos anteriormente, com vista a baixar o centro de gravidade, seria necessário reduzir os apoios das fases. Cada fase é suportada em 6 apoios que actualmente têm 900mm de altura. Estes apoios são amovíveis de forma a serem colocados adequadamente a cada fase. Para isso basta desapertar dois parafusos em cada apoio que roscam num perfil tubular situado na parte inferior do berço e constituído por dois perfis U soldados. O apoio actual é constituído por um caixilho de perfis UPN180 soldados em que as diagonais são dois LPN 60 x 60 x 5 soldados à restante estrutura. A Figura 103 exibe um desenho 3D dos actuais apoios.

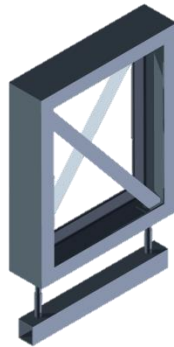


Figura 103 - Apoio de fase com 900mm de altura

O objectivo de reduzir a altura destes é provocar uma diminuição na altura da posição do centro de gravidade do conjunto berço + fase. Este feito traduz-se em várias vantagens nomeadamente:

- Apoios de fases mais leve, portanto mais facilidade de adaptar à respectiva fase;
- **Consegue-se uma altura do berço no final da rotação menor** e assim
- Menor tamanho de roda, o que implica
- Menores custos de materiais e
- Menor peso da máquina em si.

De forma a não se alterar o método de posicionamento das fases, os novos apoios serão construídos de forma idêntica aos anteriores. Isto é, será construído um caixilho idêntico ao anterior com perfis UPN180. Assim mantém-se inalterada a área de contacto entre a fase e o apoio e entre este e o berço, já usada na modelação por elementos finitos. Em vez dos 900mm de altura e 750mm de comprimento, os novos apoios terão apenas 450mm de altura (sendo o comprimento igual), e esta é limitada pela necessidade de colocação dos suportes da fase que estão aparafusados à chapa frontal da componente lateral do berço (ver Figura 33). A diferença encontra-se ao nível das diagonais. Em alternativa às duas diagonais com perfis LPN, optou-se pela utilização de um TPS quadrado de 60mm de lado e 4,5mm de espessura.

Foi feita uma verificação à capacidade da estrutura. Para a obtenção dos esforços a que estão sujeitos os apoios utilizou-se o *software* Multiframe 4D. O modelo foi reproduzido a duas dimensões e contempla apoios duplos representando as chapas que impedem a deslocação nos dois eixos devido à pressão exercida pelo aperto. Além disso foi aplicada uma carga distribuída de valor igual a 112N/mm, assim:

$$\frac{5 \times 10^5 N}{750mm \times 6 apoios} \cong 112 \frac{N}{mm. apoio} \quad (6.1)$$

A Figura 104 apresenta o modelo:

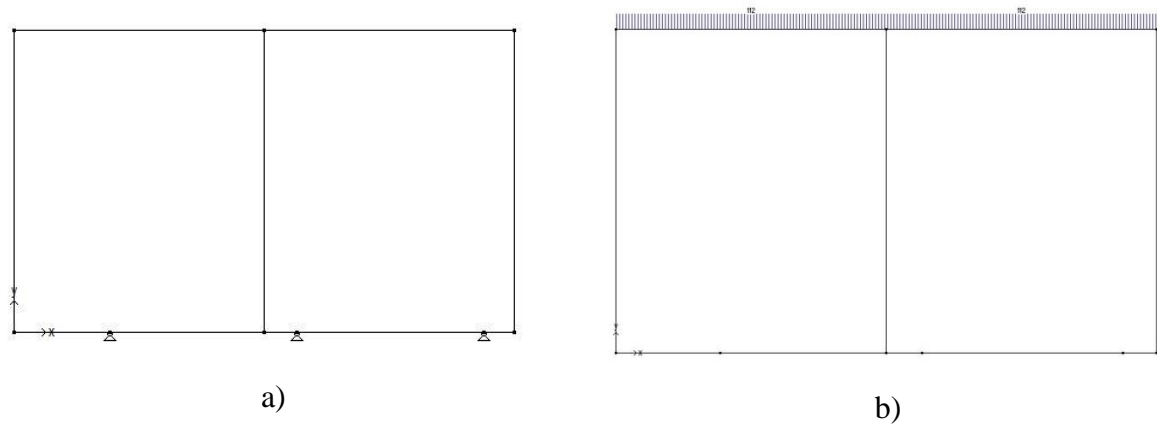


Figura 104 – Modelo em Multiframe 4D dos apoios de fases: a) condições de fronteira; b) carga

Os resultados obtidos a nível de momentos flectores foram os seguintes:

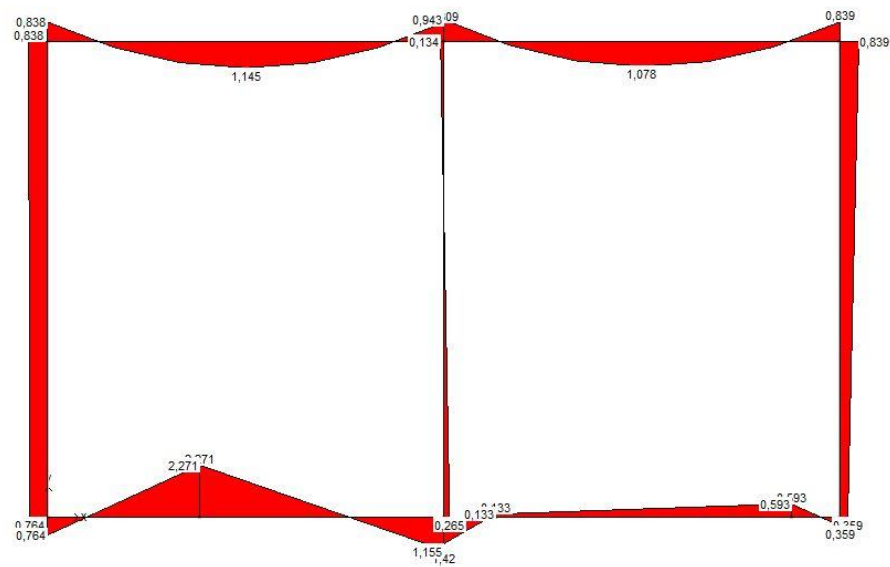


Figura 105 - Momentos flectores nos apoios de fases

E os esforços normais:

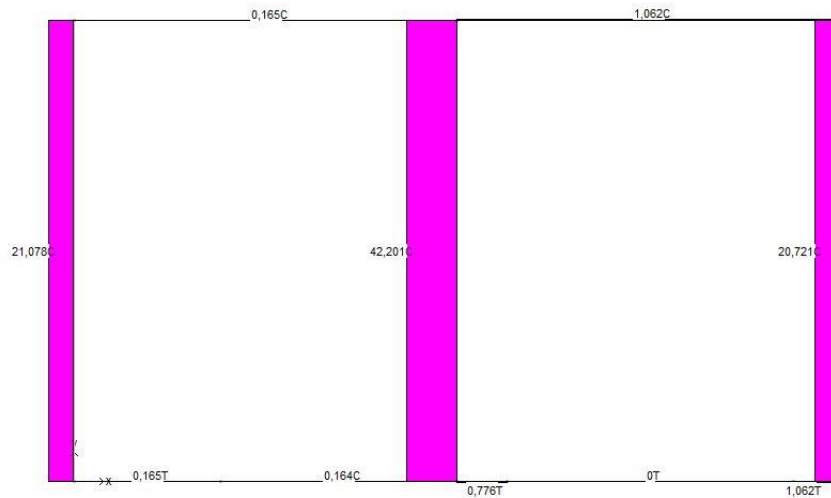


Figura 106 - Esforços normais nos apoios de fases

Vamos então prosseguir para a verificação da capacidade dos apoios, tendo em conta as fórmulas da mecânica de estruturas (Estruturas 2010). Vamos considerar um S235 ( $\sigma_{Rd} = 235MPa$ )

**Perfil UPN180:**

$$I_z = 1.14 \times 10^6 mm^4$$

$$A = 2800 mm^2$$

$$y = 50.8 mm$$

$$i_z = 20.2 mm$$

Temos dois casos que podem ser críticos:

Caso 1:

$N = 0.164 kN$  (tração)

$M_z = 2.271 kN.m$

$$\sigma_{sd} = \frac{N}{A} + \frac{M_z \times y}{I_z} = 101.26 MPa < \sigma_{Rd} \quad (6.2)$$

Caso 2:

$N = 21.078 kN$  (compressão)

$M_z = 0.838 kN.m$

Como temos esforços de compressão, vamos ter em atenção o coeficiente de encurvadura (REAPE 1986).

• **Situações regulamentares** (várias condições fronteiras)

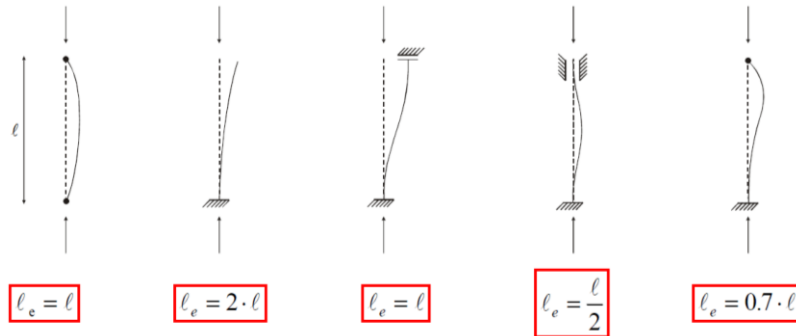


Figura 107 - Comprimento de encurvadura

Tipo de Aço	Coefficiente de esbelteza $\lambda$	Coefficiente de encurvadura $\varphi$
Fe 360	$\lambda \leq 20$ $20 < \lambda \leq 105$ $\lambda > 105$	$\varphi = 1$ $\varphi = 1,1328 - 0,00664 \lambda$ $\varphi = \frac{4802}{\lambda^2}$
Fe 430	$\lambda \leq 20$ $20 < \lambda \leq 96$ $\lambda > 96$	$\varphi = 1$ $\varphi = 1,1460 - 0,00730 \lambda$ $\varphi = \frac{4103}{\lambda^2}$
Fe 510	$\lambda \leq 20$ $20 < \lambda \leq 85$ $\lambda > 85$	$\varphi = 1$ $\varphi = 1,1723 - 0,00862 \lambda$ $\varphi = \frac{3179}{\lambda^2}$

Figura 108 - Coeficiente de encurvadura

Considerando  $l_e = l$ :

$$\lambda = \frac{l_e}{i_z} = 22.28 \quad (6.3)$$

$$\varphi = 1.1460 - 0.00730\lambda = 0.95 \quad (6.4)$$

$$\sigma_{sd} = \frac{N}{A \times \varphi} + \frac{M_z \times y}{I_z} = 45.25 \text{ MPa} < \sigma_{Rd} \quad (6.5)$$

Assim sendo a situação crítica verifica-se na base e é referente ao caso 1. Nesta situação não se verificou qualquer problema e tem-se um coeficiente de segurança superior a 2.



**Perfil TPS 60x60x4:**

$$I_z = 45.14 \times 10^4 mm^4$$

$$A = 878.8 mm^2$$

$$y = 30 mm$$

$$i_z = 22.8 mm$$

Caso crítico:

$N = 42.201$  (compressão)

$M_z = 0.265 kN.m$

$$\lambda = \frac{l_e}{i_z} = 19.73 \quad (6.6)$$

$$\varphi = 1 \quad (6.7)$$

$$\sigma_{sd} = \frac{N}{A \times \varphi} + \frac{M_z \times y}{I_z} = 65.63 MPa < \sigma_{Rd} \quad (6.8)$$

No perfil TPS estamos a trabalhar com um coeficiente de segurança superior a 3.

Concluimos assim que os apoios de fases estão perfeitamente dimensionados para o esforço a que vão estar submetidos. Ao contrário do material utilizado no berço, aqui pode ser perfeitamente utilizado um S235 em vez de um S275. A Figura seguinte apresenta a configuração futura dos apoios.

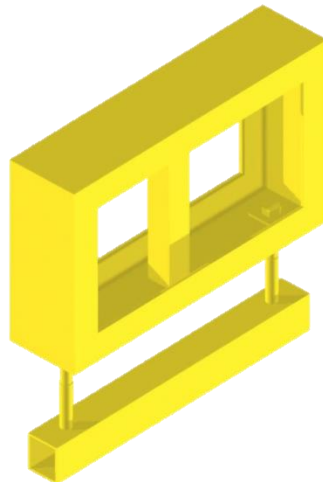


Figura 109 - Configuração futura dos apoios das fases

### 6.3 Carril

O estudo da distribuição das tensões a que este componente será submetido foi apresentado na secção 5.2.4. Aqui verificou-se que as dimensões anteriormente definidas cumprem os requisitos com um coeficiente de segurança bastante considerável e o carril está preparado até para suportar todo o peso do berço e da fase num só carril (caso algum acidente aconteça). Desta forma será também suficiente utilizar um S235.

O carril é construído numa estrutura toda ela soldada. Consiste numa chapa de base, e outras quatro chapas fazem o interior onde serão soldados os pinos. A Figura que se segue apresenta um desenho em Inventor® do componente em questão.

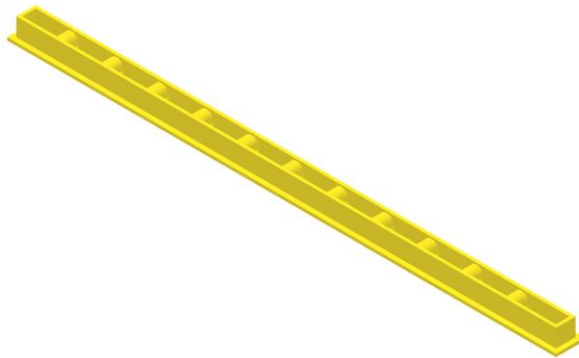


Figura 110 - Desenho 3D do carril

A especial atenção no que toca à soldadura vai para a colocação dos pinos. Em vez de serem soldados por dentro a cada uma das chapas, estas são furadas e o pino é colocado nesses furos e soldado por fora. Desta forma:

- A soldadura não fica ao corte;
- O posicionamento dos pinos é conseguido mais facilmente;
- Melhor precisão no posicionamento dos pinos.

Para isto os pinos devem conter um chanfro em cada uma das pontas como explicita a Figura 111.

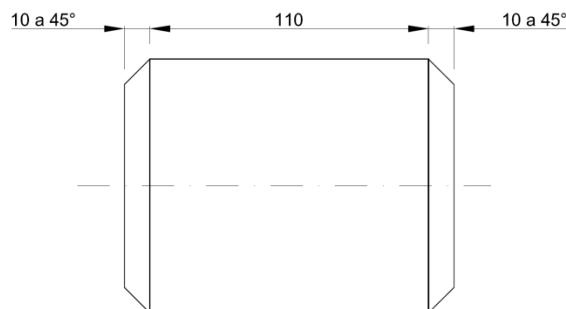


Figura 111 - Desenho de detalhe dos pinos

Para a fixação do carril ao chão serão usadas seis buchas M16 da marca Hilti, sendo a referência destas HSA M16x120/5/25 (Hilti 2013). Estas buchas são em aço ao carbono galvanizado, e devem ser utilizadas em betão não fendilhado. Segundo indicações do fabricante, o furo no chão deverá ter 115mm, o comprimento da bucha é de 120mm, e pode ser usada em placas de espessura que varie de 5mm a 25mm, sendo que no nosso caso estamos perante uma placa de 20mm. A Figura 112 apresenta uma imagem da bucha em questão.



Figura 112 - Bucha Hilti HSA M16x120/5/25

A Figura 113 consiste no desenho de execução do carril, mostrando em corte a zona central. Na Figura pode ser visto tanto a colocação do pino, como as instruções de soldadura e a colocação das buchas.

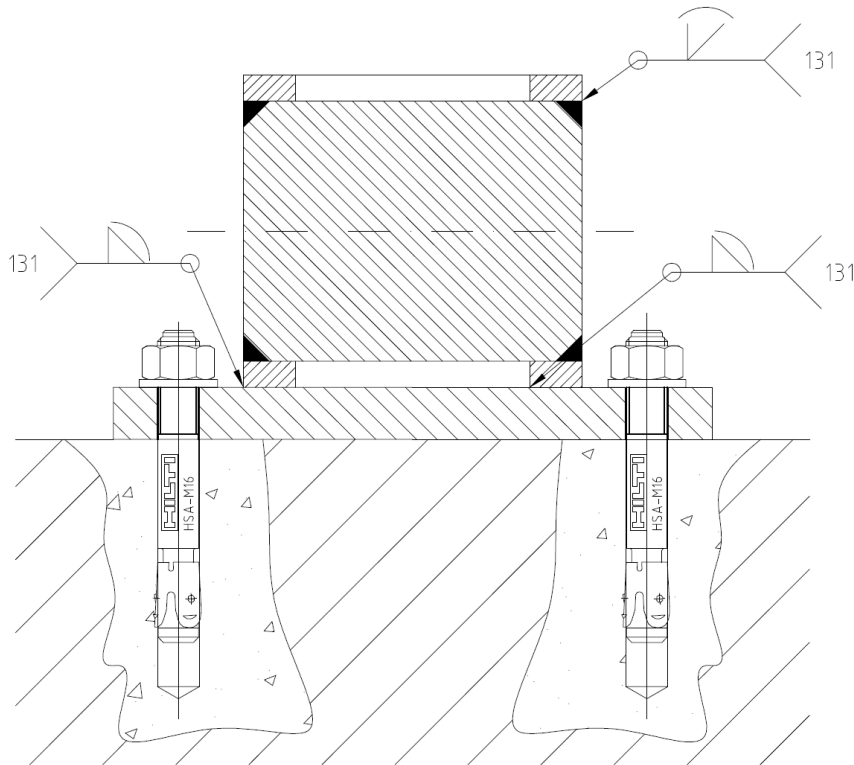


Figura 113 - Vista em corte do carril

## 6.4 Apoio para o Berço

No capítulo 4 realizou-se um estudo aprofundado relacionado com o movimento de rotação. O estudo incidiu sobre a posição relativa do centro de massa face ao ponto de apoio com o exterior (neste caso o carril). Concluiu-se que era necessário garantir que a posição do centro

de massa nunca poderia ficar alinhada com o ponto de apoio, e por essa razão este teria de se ir deslocando constantemente para trás ao longo da rotação. Assim, no final da rotação esta condição mantém-se. Neste momento é necessário que a ponte liberte o berço para pegar na fase e colocá-la na parte inferior da cuba, e caso nada impeça, o berço tenderá a iniciar uma rotação em sentido contrário devido à condição anteriormente vista. Por esta razão será necessário colocar um apoio que impeça essa rotação. A Figura 114 remete para o local de colocação desse apoio.

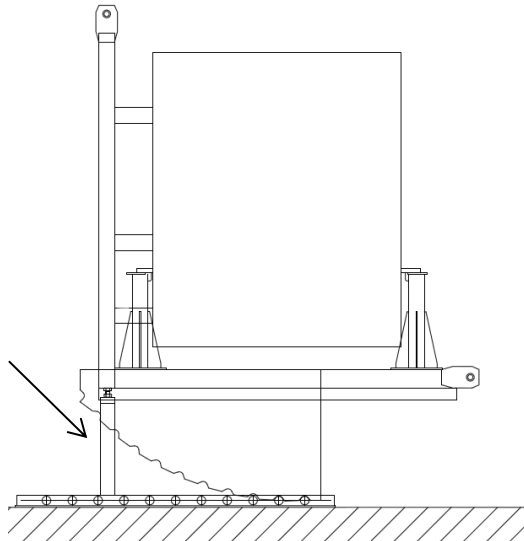


Figura 114 - Local de colocação do apoio do berço

Este projecto foi realizado tendo como base o apoio usado na mesa de montagem e viragem de CM's CORE apresentada na Figura seguinte.



Figura 115 - Apoio da mesa e de montagem e viragem de CM's CORE

Este componente possui uma chapa de base, duas rodas para poder facilmente ser deslocado, um perfil tubular soldado à base, três esquadros para melhor estabilidade e uma tampa com um furo roscado soldado ao perfil tubular. Por fim é enroscado um parafuso de cabeça

hexagonal, cuja cabeça será o local de apoio do berço, e o aperto final é dado por uma porca entre o parafuso e a tampa. Desta forma consegue-se uma ligeira afinação na altura pretendida.

Na posição de repouso as rodas não tocam no chão, caso contrário a estabilidade deste apoio estaria comprometida. Para a deslocação é necessário inclinar este componente permitindo que as rodas toquem no chão e a existência de uma pega possibilita este processo. Além disso, é necessário que na face da chapa de base entre as duas rodas exista um chanfro para não impedir o contacto das rodas com o pavimento. Na Figura 116 é apresentado o desenho desta chapa.

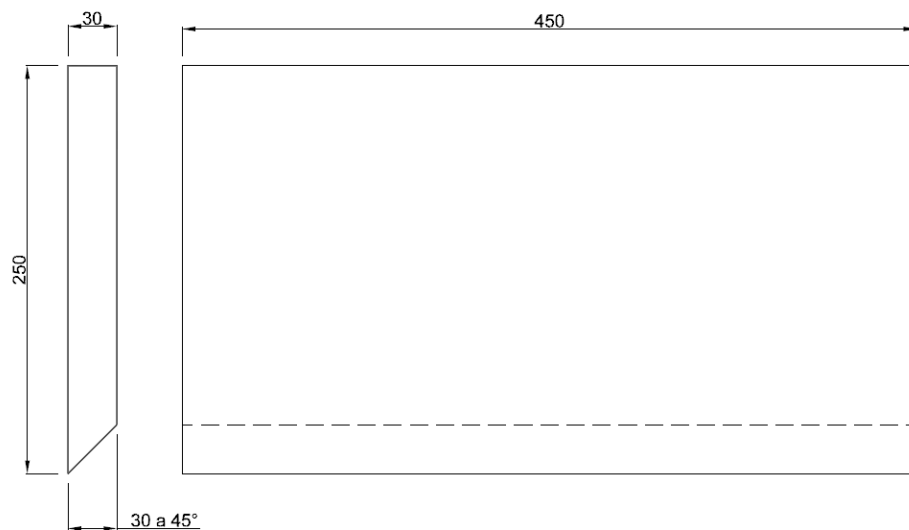


Figura 116 - Desenho da chapa de base do apoio do berço

Foram escolhidas rodas em poliamida com rolamento de rolos da Mecanarte com as seguintes características (Mecanarte 2013):

Modelo	110336 RODA 1/N-100
Diâmetro da Roda	100mm
Largura da Roda	35mm
Diâmetro do Furo	12mm
Largura do Canhão	37mm
Peso Total	0.12kg
Capacidade de Carga	300kg

Figura 117 - Características das rodas utilizadas no apoio do berço

Para fixação da roda à base foi utilizada a configuração apresentada na Figura 118.

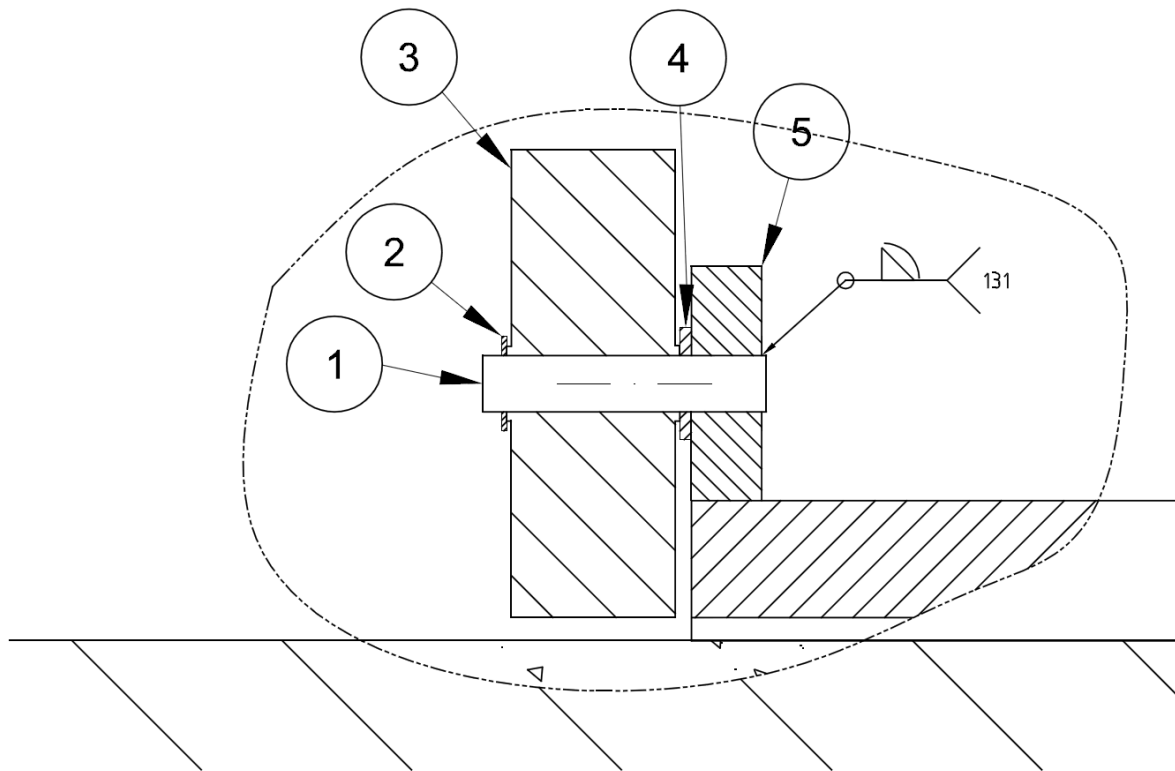


Figura 118 - Desenho do pormenor da zona da roda do apoio do berço

1. Veio de diâmetro igual ao diâmetro do furo da roda ( $\varnothing = 12mm$ );
2. Anilha de fixação para veios da Fabory com o ID: 36230120001 (Fabory 2013): esta anilha ajuda a impedir a deslocação do veio. A Figura seguinte apresenta uma imagem deste tipo de anilhas:



Figura 119 - Anilha para fixação de veios

3. Roda da Mecanarte - 110336 RODA 1/N-100;
4. Anilha plana ISO 7069 – 12 – 140HV: esta anilha tem o objectivo de possibilitar uma rotação mais livre da roda evitando o contacto desta com o componente 5;
5. Chapa com um furo de diâmetro ligeiramente superior ao do veio: esta permite a ligação da roda à restante estrutura do apoio dado que é nela que o veio é soldado, conforme se mostra na Figura 118.

Relativamente ao perfil tubular usado, optou-se por um perfil de 168.3mm de diâmetro e 4.5mm de espessura dado ser um perfil muito utilizado e portanto abundante no mercado.

Vamos agora estimar o esforço a que o apoio estará sujeito quando se encontra a suportar o berço. O apoio **A** remete para o local de colocação do apoio do berço e **B** para o apoio da roda com o carril. A força  $F$  é aplicada no centro de massa do conjunto berço + fase.

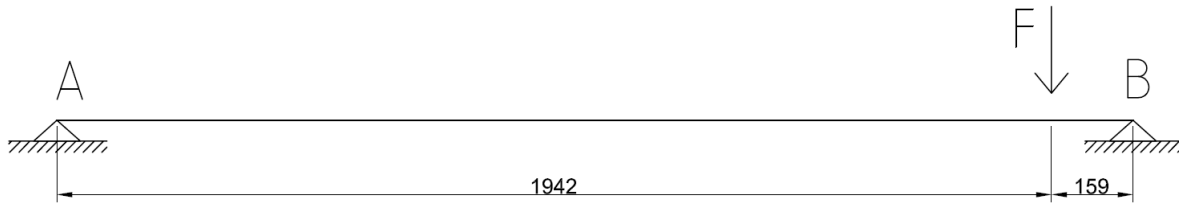


Figura 120 - Diagrama para cálculo do esforço no apoio do berço

$$F = P_{fase} + P_{berço} = 50t \times g + 9,71t \times g \cong 600kN \quad (6.9)$$

$$\sum M_A = 0 \rightarrow -F_A \times 1942 + 600 \times 159 = 0 \rightarrow F_A \cong 50kN \quad (6.10)$$

Recorrendo à Figura 109:

$$l_e = 2 \times l = 2400mm \quad (6.11)$$

**Perfil Ø168, 3x4,5** (construído num S235)

$$A = 2315,67mm^2$$

$$i_z = 58,1 mm$$

Portanto:

$$\lambda = \frac{l_e}{i_z} = 41,3 \quad (6.12)$$

$$\varphi = 1,1328 - 0,00664 \times \lambda = 0,86 \quad (6.13)$$

$$\sigma_{sd} = \frac{N}{A \times \varphi} = 25,15MPa < \sigma_{Rd} \quad (6.14)$$

Mediante os cálculos apresentados conclui-se que este perfil é mais que suficiente.

Como se referiu no início do capítulo, é soldada uma tampa com um furo roscado que permite a colocação de um parafuso e desta forma consegue-se uma variação da altura do berço entre os 1348mm e os 1460mm. Pormenor apresentado na Figura 121.

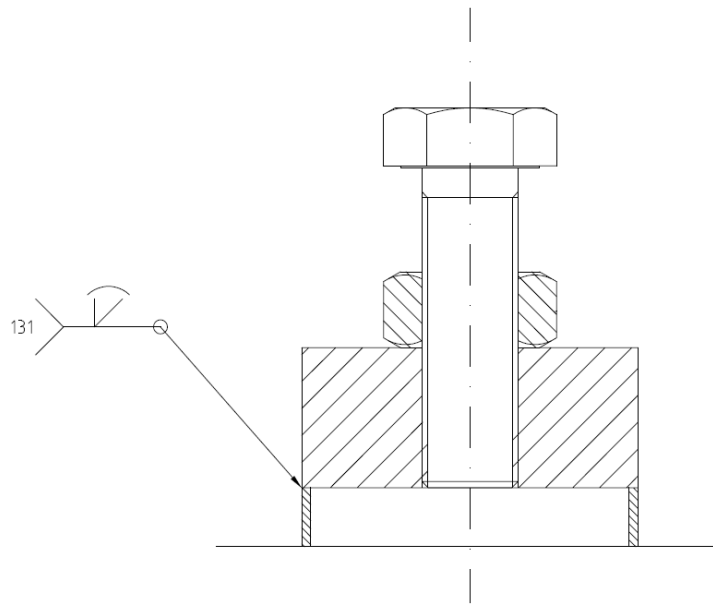


Figura 121 - Pormenor da ligação entre o parafuso e a tampa do berço

O parafuso será um: H ISO 4017 - M48 x 160 - 8.8; e a porca: H ISO 4032 - M48.

## 6.5 Características do berço

Estando o projecto concluído, faz agora todo sentido apresentar um sumário das características do berço. A seguinte tabela apresenta as informações mais pertinentes.

<b>Volume total</b>	1,235m <sup>3</sup>
<b>Massa</b>	9707,1kg
<b>Massa de cada roda</b>	1303,1kg
<b>Capacidade</b>	50t
<b>Altura máxima da fase na horizontal</b>	2,9m

Figura 122 - Características e capacidades do berço

Sendo a massa do berço antes deste projecto 6264kg e após 9707,1kg, e sabendo que cada roda tem uma massa de 1303,1kg, podemos concluir que os reforços adicionados aumentaram o peso do berço em 836,9kg.

A altura máxima da fase na posição horizontal é restringida pelo local onde é ainda possível colocar os apoios superiores das fases, que podem ser vistos na Figura 33.



A Figura 123 apresenta um desenho 3D do berço com as novas alterações.

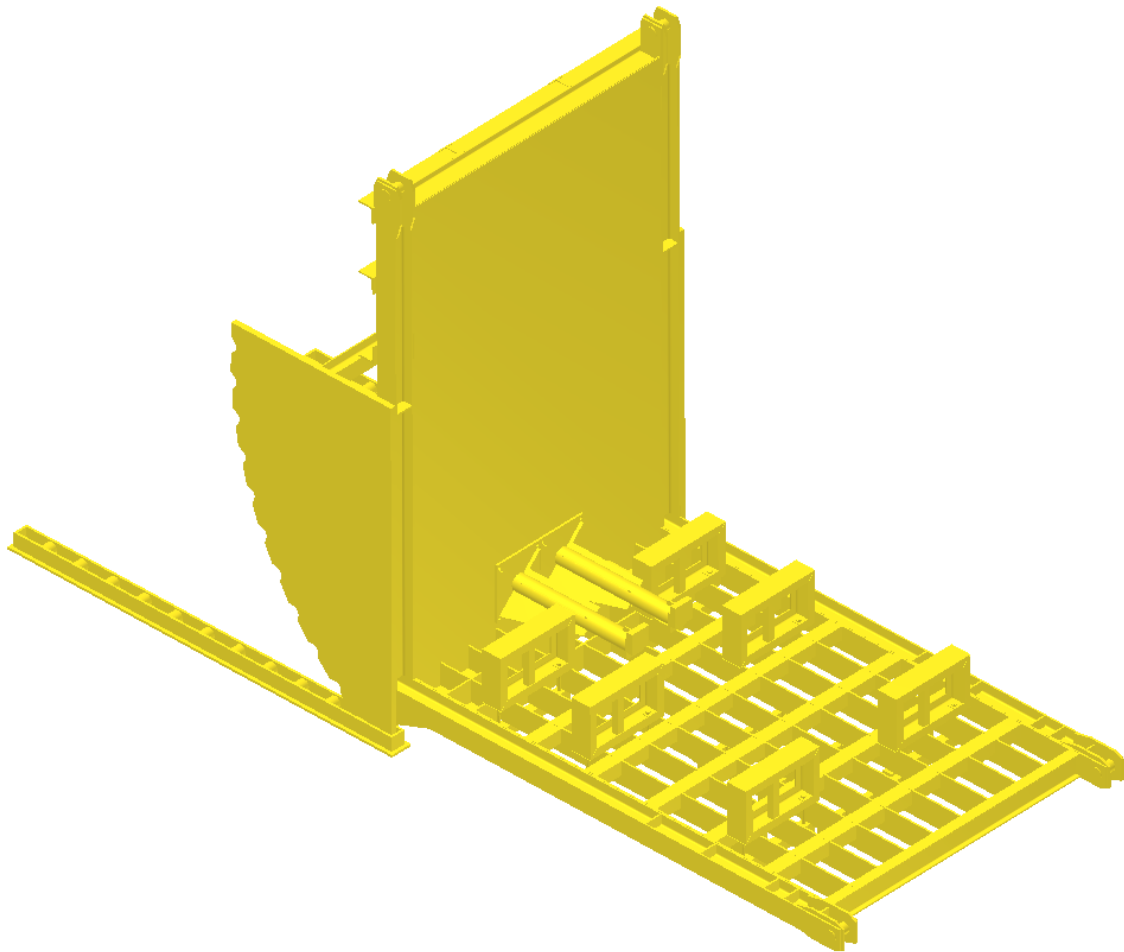


Figura 123 - Desenho 3D final do berço



## **7 Conclusões e Perspectivas de Trabalhos Futuros**

### **7.1 Conclusões**

Um projecto em empresa tem o objectivo de transpor os conceitos teóricos, obtidos ao longo da vida académica, para a prática verificando as suas potencialidades e limitações, bem como o de preparar, neste caso o mestrando, para a sua vida profissional como engenheiro. No caso específico deste projecto, não foi possível em tempo útil a sua concretização prática, isto é, as alterações aqui propostas não foram ainda implementadas. Desta forma não é possível obter provas relativas à funcionalidade prática da máquina. No entanto, e apesar da ausência de dados que permitam corroborar o atingir dos objectivos propostos, é possível afirmar, pela interpretação dos vários tópicos e etapas presentes neste projecto, que o rigor esteve sempre incutido no trabalho e que tudo leva a querer que as alterações iriam de encontro com o pretendido.

A percepção das limitações de conceitos teóricos implica o reconhecimento da necessidade de verdadeiramente apreender as noções básicas por detrás do conhecimento académico, de forma a adaptá-lo ao panorama industrial sempre mutável. O esforço na melhoria de equipamento para auxílio dos processos de fabrico é, à semelhança de qualquer iniciativa individual, apenas uma parte do planeamento geral de intervenções na produção. Como tal, o seu impacto será sentido de forma integrada na melhoria geral na fábrica. No caso em questão procurou-se melhorar um berço para rotação de fases dos transformadores SHELL e torna-lo capaz de suportar 50 toneladas.

Após ter sido proposto o tema deste projecto, deu-se início à pesquisa e ao estudo da configuração e funcionamento de outros berços idênticos com soluções construtivas que poderiam ser aplicadas no caso em questão. Devido à especificidade da máquina, não existe no mercado um grande número de berços que pudessem ser estudados, nomeadamente os específicos para rotação de fases de transformadores SHELL, e desta forma o trabalho bibliográfico não é muito extenso, mas procura abranger todas as soluções existentes. Procedeu-se então à análise aprofundada das limitações e problemas do berço com a sua actual configuração. A intervenção na configuração do berço é justificada pela instabilidade que advém da existência de um único eixo de rotação. O momento crítico é verificado aquando do alinhamento do centro de massa do conjunto fase + berço com eixo de rotação, sendo este, além dos cabos ligados à ponte rolante, o ponto de apoio do berço com o exterior.

Nesta etapa já estava interiorizado o problema do berço e as soluções de possível aplicação, e, portanto, já se conseguia fazer uma escolha válida da solução a aplicar. Optou-se por utilizar uma roda dentada, com um engrenamento análogo ao de uma solução pinhão-cremalheira, garantindo que o ponto de apoio com exterior se encontra sempre atrás da localização do centro de massa. Antes, da verificação da capacidade da estrutura para as 50 toneladas, seria necessário estudar e projectar a roda dentada, a sua configuração e posição no berço. Realizou-se, então, o estudo do movimento de rotação do berço até se conseguir um método de desenho da roda que cumprisse os objectivos. Concluiu-se que a melhor forma de aplicar as rodas seria soldá-las lateralmente ao berço, engrenando estas num carril fixo ao chão da fábrica.

Na modelação por elementos finitos utilizou-se o programa Abaqus CAE, e realizou-se o estudo da integridade da estrutura do berço, concluindo que seria necessário aplicar certos reforços para alívio de tensões.

Por fim procedeu-se à elaboração de desenhos do berço com as respectivas alterações, isto é:

- Desenho de conjunto do berço com os respectivos componentes (carril, apoio do berço, apoio de fase e o próprio berço);
- Desenhos de execução de cada componente e do próprio berço;
- Desenho de detalhe de cada um dos novos reforços do berço e cada peça dos novos componentes do berço (carril, apoio do berço, apoio de fase).

Concretizado este projecto, podemos afirmar que ficaríamos com um berço capaz de suportar 50 toneladas e com uma rotação mais segura, onde se utilizam apenas os cabos ligados à base do berço.

Em suma, este foi um projecto que envolveu estudo, trabalho e esforço, mas que, devido à sua complexidade, permitiu o uso de inúmeras ferramentas e capacidades adquiridas ao longo do curso, abrangendo várias áreas, como as de desenho, mecânica de estruturas e de cinemática, e todas as outras que advêm do projecto de construção mecânica, nomeadamente elementos finitos. Desenvolveu-se também capacidades no uso de *softwares* específicos da área, como o Abaqus, AutoCAD®, Inventor® e Multiframe 4D. Desta forma, esta dissertação conseguiu consolidar muitos dos conhecimentos adquiridos ao longo do curso, bem como perceber a sua aplicabilidade no mundo real da engenharia.

## 7.2 Perspectivas de Trabalhos Futuros

Como vimos este projecto não está completamente concluído pois ainda não foram concretizadas as alterações ao berço. Seria então interessante acompanhar todo o processo de

fabricação dos novos componentes e montagem destes, verificando a funcionalidade deste projecto.

Por outro lado, faria também sentido a realização de um projecto considerando um berço completamente novo, onde se conseguisse colocar fases maiores a nível de massa e de dimensões, e onde fosse mais prático a aplicação de outras soluções para o processo de rotação de fases comparando assim custos vs. utilidade em ambos os casos.



## 8 Bibliografia e Referências

- (EFACEC 2013) EFACEC. *Manual do Colaborador*. 2013
- (Marques 2008) Marques, Joana. *Desenho de uma Nova Ferramenta de Planeamento da Produção de Transformadores Core*. Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2008
- (Teixeira 2008) Teixeira, Hélio. *SPE Visual na EFACEC Energia S.A.* Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2008
- (Georg 2013) Web site Georg. <http://www.georg.com>. [Online] 2013
- (Hi-Kon 2013) Web site Hi-Kon. <http://www.hi-kon.hr>. [Online] 2013
- (Shandong 2013) Web site Shandong Juli Electro-Machinery. <http://en.sdjuli.com>. [Online] 2013
- (MBD 2013) Web site MBD. <http://www.maschinenbau-buch.de>. [Online] 2013
- (Azevedo 2003) Azevedo, Álvaro F. M. *Método dos Elementos Finitos*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 1ª Edição. 2003
- (Felippa 1998) Felippa, Carlos. *Advanced Finite Element Methods for Solids, Plates and Shells, Aerospace Engineering Sciences*. University of Colorado at Boulder. 1998
- (Liu-Quek 2003) Liu, G. R.; Quek, S. S. *The Finite Element Method: A Practical Course*. Butterworth Heinemann. 2003
- (Delgado-Arêde 2000) Delgado, Raimundo; Arêde, António. *Dinâmica de Estruturas*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2000
- (Vasco 2007) Sá, Vasco. *MECÂNICA I*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2006/2007
- (Gomes 2013) Gomes, Carlos Reis. *Estruturas Metálicas – Pavilhões Industriais*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2013
- (Estruturas 2010) Gomes, Carlos Reis. *Mecânica das Estruturas* - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2010
- (REAPE 1986) *Regulamento de Estruturas de Aço para Edifícios*. Imprensa Nacional da Casa da Moeda. Lisboa. 1986.
- (Hilti 2013) Web site Hilti. <http://www.hilti.pt>. [Online] 2013

**(Metalização 2013)** *Web site Metalização Sobralense.* <http://www.metalizacao.pt>. [Online] 2013

**(Robbialac 2013)** *Web site Robbialac.* <http://www.robbialac.pt/>. [Online] 2013

**(Mecanarte 2013)** *Web site Mecanarte.* <http://www.mecanarte.pt/>. [Online] 2013

**(Fabory 2013)** *Web site Fabory.* <http://www.fabory.pt/>. [Online] 2013



## Anexo A – Organigrama do Grupo Efacec

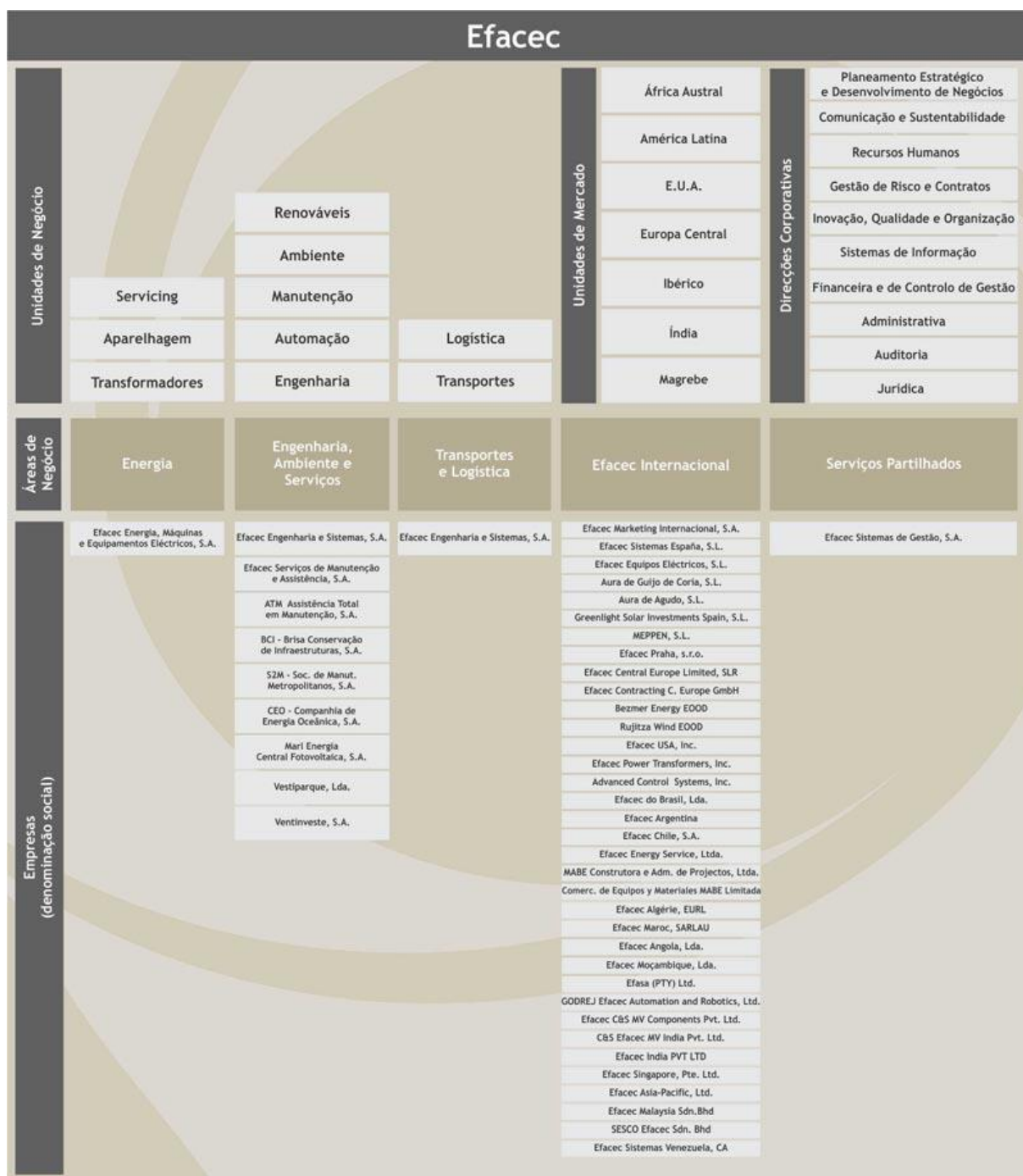


Figura 124 - Organigrama do Grupo EFACEC



## Anexo B - Formulação Elemento Finito Tridimensional (8 Nós)

Por forma a não tornar este anexo excessivamente longo, explicitar-se-á a formulação do elemento finito para o caso concreto de um elemento finito sólido de oito (*bricks*). O uso deste elemento justifica-se pelo facto de ter sido o utilizado durante a modelação em Abaqus. Para além deste tipo de elemento existem ainda:

- Elementos de Viga
  - Viga de Euler-Bernoulli
  - Viga de Timoshenko
- Elementos de Placa
  - Placa de Kirchhoff
  - Placa de Mindlin
- Elementos Tetraédricos
- ...

Cuja formulação é em tudo idêntica ao elemento finito sólido de oito, sendo que cada um tem as suas simplificações próprias, assim como as respectivas funções de forma.

### B.1 Nós, Graus de Liberdade (Variáveis Nodais)

A nossa abordagem ao elemento será do tipo trilinear (Felippa 1998), isto é, serão considerados oito nós na abordagem como ilustra a figura seguinte.

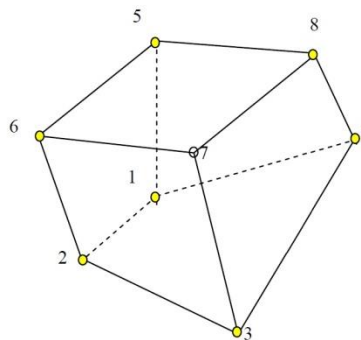


Figura B 1 - Elemento hexaédrico de 8 nós

Desta forma, os deslocamentos de cada nó são (Azevedo 2003):

$$d_{ei} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix}, (i = 1, 2, \dots, 8) \quad (\text{B.1})$$

Da análise da equação anterior facilmente percebemos que iremos ter 24 graus de liberdade:  $p = 8 \times 3 = 24$ , 3 graus por cada nó.

Os vectores dos deslocamentos nodais e das forças nodais equivalentes às acções exteriores são então os seguintes (Azevedo 2003):

$$d_e = \begin{Bmatrix} d_{e1} \\ d_{e2} \\ \vdots \\ d_{e8} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ \vdots \\ u_8 \\ v_8 \\ w_8 \end{Bmatrix} \quad F = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_8 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{1u} \\ F_{1v} \\ F_{1w} \\ F_{2u} \\ F_{2v} \\ F_{2w} \\ \vdots \\ F_{8u} \\ F_{8v} \\ F_{8w} \end{Bmatrix} \quad (\text{B.2})$$

## B.2 Coordenadas

No referencial geral, a matriz das coordenadas cartesianas dos nós do elemento é a seguinte.

$$x = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_8 & y_8 & z_8 \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

Vamos agora considerar um referencial nodal  $\xi, \eta, \zeta$  tal que (Liu-Quek 2003):

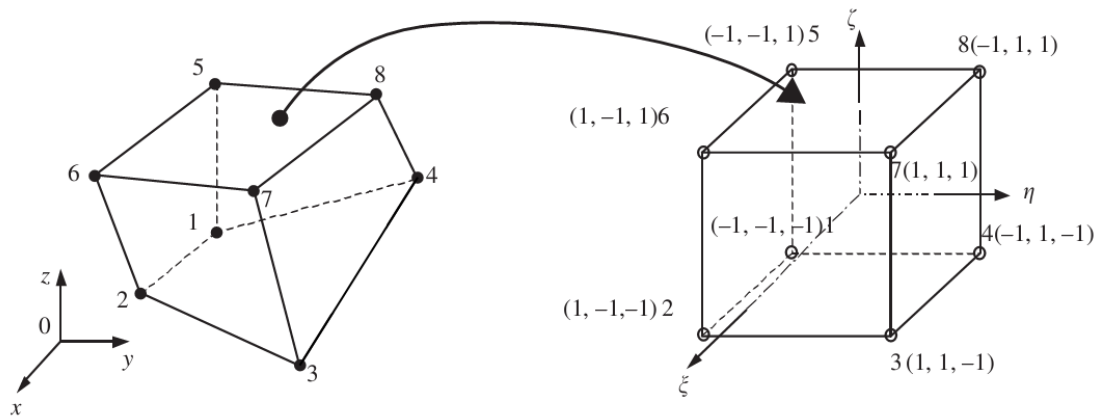


Figura B 2 - Elemento hexaédrico representado no referencial generalizado e no referencial nodal

- $\xi$  varia de -1 no centro da face 1485 até +1 na face 2376
- $\eta$  varia de -1 no centro da face 1265 até +1 na face 3487
- $\zeta$  varia de -1 no centro da face 1234 até +1 na face 5678

### B.3 Funções de Forma

As funções de forma são o que nos permite efectuar a mudança de referencial e são naturalmente necessárias na análise que se irá efectuar. Estas serão arranjadas numa matriz de funções de forma N com que serão efectuados os cálculos relevantes, como se mostra de seguida (Liu-Quek 2003):

$$N = [N_1 \ N_2 \ \dots \ N_8] \quad N_i = \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, 8) \quad (\text{B.4})$$

Para o caso do hexaedro a função de forma será (Liu-Quek 2003):

$$N_i = \frac{1}{8} (1 + \xi \xi_i) (1 + \eta \eta_i) (1 + \zeta \zeta_i), \quad i = 1, 2, \dots, 8 \quad (\text{B.5})$$

Podemos estabelecer uma tabela com o valor de  $\xi$ ,  $\eta$  e  $\zeta$  em cada nó (Felippa 1998):

Nó	$\xi$	$\eta$	$\zeta$
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	+1	+1	-1
4	-1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	+1	+1	+1
8	-1	+1	+1

Figura B 3 - Tabela com o Valor de  $\xi$ ,  $\eta$  e  $\zeta$  em cada nó

As funções de forma podem ser agora reescritas:

$$N_1 = \frac{1}{8}(1 - \xi)(1 - \eta)(1 - \zeta)$$

$$N_2 = \frac{1}{8}(1 + \xi)(1 - \eta)(1 - \zeta)$$

$$N_3 = \frac{1}{8}(1 + \xi)(1 + \eta)(1 - \zeta)$$

$$N_4 = \frac{1}{8}(1 - \xi)(1 + \eta)(1 - \zeta)$$

$$N_5 = \frac{1}{8}(1 - \xi)(1 - \eta)(1 + \zeta)$$

$$N_6 = \frac{1}{8}(1 + \xi)(1 - \eta)(1 + \zeta)$$

$$N_7 = \frac{1}{8}(1 + \xi)(1 + \eta)(1 + \zeta)$$

$$N_8 = \frac{1}{8}(1 - \xi)(1 + \eta)(1 + \zeta)$$

(B.6)

A interpolação das coordenadas cartesianas é efectuada com as seguintes expressões (Azevedo 2003):

$$x = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta)x_i$$

$$y = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta)y_i$$

$$z = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta)z_i$$

(B.7)

#### B.4 Interpolação do campo de deslocamentos

A interpolação do campo de deslocamentos é conseguida multiplicando os deslocamentos nodais pelas funções de forma (Azevedo 2003):

$$U = Nd_e \quad (B.8)$$

Colocando na forma matricial:

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & \dots & N_8 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & \dots & 0 & N_8 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & \dots & 0 & 0 & N_8 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ \vdots \\ u_8 \\ v_8 \\ w_8 \end{Bmatrix} \quad (B.9)$$

#### B.5 Matriz das deformações

Neste caso, como temos 8 nós, a matriz das deformações será dividida em 8 sub-matrizes (Azevedo 2013):

$$B = [B_1 \ B_2 \ B_3 \ B_4 \ B_5 \ B_6 \ B_7 \ B_8] \quad (B.10)$$

Para obtermos a matriz das deformações vamos ter de recorrer ao operador diferencial L, que no nosso caso é igual a (Azevedo 2013):

$$L = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 \\ 0 & \partial/\partial y & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial z \\ 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y \\ \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial x \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{B.11})$$

Sendo  $B_i = LN_i$ , fica (Azevedo 2013):

$$B_i = \begin{bmatrix} \partial N_i/\partial x & 0 & 0 \\ 0 & \partial N_i/\partial y & 0 \\ 0 & 0 & \partial N_i/\partial z \\ 0 & \partial N_i/\partial z & \partial N_i/\partial y \\ \partial N_i/\partial z & 0 & \partial N_i/\partial x \\ \partial N_i/\partial y & \partial N_i/\partial x & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{B.12})$$

Como as funções de forma estão definidas em função das coordenadas  $\xi$ ,  $\eta$  e  $\zeta$  e não em  $x$ ,  $y$  e  $z$ , vamos recorrer à regra das derivadas parciais (Liu-Quek 2003):

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} &= \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \xi} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} &= \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \eta} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} &= \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \zeta} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \zeta} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{aligned} \quad (\text{B.13})$$

Colocando estas equações sob a forma de matriz temos:



$$\begin{pmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} \end{pmatrix} = J \begin{pmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (\text{B.14})$$

Onde J é a matriz Jacobiana, que nos vai permitir relacionar as funções de formas com as coordenadas x, y e z, definida por (Azevedo 2013):

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \quad (\text{B.15})$$

Recorrendo à interpolação de coordenadas que já foi vista anteriormente, e trabalhando a matriz J, podemos reescrever a matriz Jacobiana como (Azevedo 2013):

$$J = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^8 x_i \frac{\partial N_i}{\partial \xi} & \sum_{i=1}^8 y_i \frac{\partial N_i}{\partial \xi} & \sum_{i=1}^8 z_i \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \sum_{i=1}^8 x_i \frac{\partial N_i}{\partial \eta} & \sum_{i=1}^8 y_i \frac{\partial N_i}{\partial \eta} & \sum_{i=1}^8 z_i \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \\ \sum_{i=1}^8 x_i \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} & \sum_{i=1}^8 y_i \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} & \sum_{i=1}^8 z_i \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \quad (\text{B.16})$$

Reescrevendo:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{pmatrix} = J^{-1} \begin{pmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} \end{pmatrix} \quad (\text{B.17})$$

Através desta equação já podemos calcular os membros da matriz das deformações.

## B.6 Matriz de Rigidez

A matriz de rigidez do elemento finito é calculada com a expressão genérica (Liu-Quek 2003):

$$K = \int_V B^T D B dV \quad (B.18)$$

Onde  $D$  é a matriz de elasticidade. Após substituição:

$$K = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} B^T D B \det[J] d\xi d\eta d\zeta \quad (B.19)$$

Os elementos da matriz de rigidez,  $K_{ij}$ , representam a força de restituição elástica desenvolvida na direcção  $i$  devida a um deslocamento unitário na direcção  $j$ .